



Pro gradu -tutkielma
Geologia
Kallioperä- ja taloudellinen geologia

3D-VALOKUVIEN HYÖDYNTÄMINEN PYHÄSALMEN KAIVOKSELLA

Mervi Kähkönen

2017

Ohjaaja(t):
Mikko Numminen
Tapani Rämö

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
GEOTIETEIDEN JA MAANTIETEEN LAITOS
GEOLOGIA

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen		Laitos/Institution – Department Geotieteiden ja maantieteen laitos	
Tekijä/Författare – Author Mervi Kähkönen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title 3D-valokuvien hyödyntäminen Pyhäsalmen kaivoksella			
Oppiaine / Läroämne – Subject Geologia			
Työn laji/Arbetets art – Level Pro Gradu -tutkielma	Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages	
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Pyhäsalmen kaivoksella otetuista 3D-valokuvista analysoitiin malmion ja sivukiven rakoilua Surpac-ohjelmiston Structural Suite –lisäosalla. Lisäksi tehtiin rakennegeologisia havaintoja, sekä kokeiltiin 3D-valokuvaustekniikan soveltuvuutta kallion liikkeen seurantaan.</p> <p>Kuvien perusteella malmiossa havaittiin 33 päärakosuunnasta poikkeavaa rakoiluvyöhykettä. Erityisesti korostuivat malmion keskiosia lävistävät, lounaasta koilliseen suuntautuvat rakoiluvyöhykkeet. Malmiossa havaittiin myös lähes samansuuntainen ja samalla kohdalla sijaitseva, sulkeumista koostuva rakenne. Lounaasta koilliseen suuntautuvat rakoiluvyöhykkeet on ilmeisesti aiemmin havaittu jo seismisten tapahtumien perusteella. Malmiossa havaittiin myös loiva-asteisia rakoiluvyöhykkeitä, joiden kaateen suunta on lähinnä pohjoiseen tai etelään. Sivukiven puolella oli havaittavissa samansuuntaisia pegmatiittijuonia, sekä yksittäisiä rakoja ja mahdollisia pienimittakaavaisia siirroksia.</p> <p>Selvästi havaittavaa kallion liikettä ei ilmeisesti tapahtunut seurantajakson aikana. Kuvien avulla ei pysty havainnoimaan hyvin pientä liikettä, mutta suuren mittakaavan liikkeen kuvien avulla mahdollisesti voi havaita.</p>			
<p>Avainsanat – Nyckelord – Keywords Pyhäsalmi, kaivos, 3D-valokuvaus, 3D-valokuva, 3D, rako, rakoilu, kallio, kalliomekaniikka, kallion liike</p>			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
<p>Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information</p>			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Science		Laitos/Institution– Department Department of Geosciences and Geography	
Tekijä/Författare – Author Mervi Kähkönen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title The Utilization of 3D-Photographs in Pyhäsalmi Mine			
Oppiaine /Läroämne – Subject Geology			
Työn laji/Arbetets art – Level Master's thesis		Aika/Datum – Month and year	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages
Tiivistelmä/Referat – Abstract <p>Fracturing of the ore and wall rock in Pyhäsalmi mine was analysed from 3D-photographs, using Structural Suite –add-on to Surpac. Observations of geological structures were also made. The suitability of 3D-photographing method to observe rock mass movement was also tested.</p> <p>33 fracture zones, which differ from the main joint direction, were observed from the pictures. In particular, fracture zones that trend from southwest to northeast and pierce the ore body from the middle, were prominent. There was also a zone of rock inclusions, almost at the same direction and same location, as the southwest to northeast trending fracture zones are. Presumably, from southwest to northeast trending fracture zones have been noticed earlier on the basis of the seismic events. Gently dipping fracture zones were also noted, in which dip direction was mostly towards north or south. In wall rock, there were pegmatite veins, singular joints and possibly small-scale faults, which were gently dipping toward north or south.</p> <p>Apparently clearly visible rock mass movement did likely not occur during the monitoring period. It is not possible to observe small-scale movement with 3D-photographs, but large scale movement can possibly be observed from the pictures.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Pyhäsalmi, mine, 3D-photogrammetry, 3D-photograph, 3D, fracture, fracturing, rock, rock mechanic, rock mass movement			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information			

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	5
1.1. Pyhäsalmen kaivos	5
1.2. Vulkaaniset massiiviset sulfidimalmit	5
1.3. Tutkielman tavoite	6
2. TUTKIMUSALUEEN GEOLOGIA.....	8
2.1. Alueellinen geologia	8
2.2. Pyhäsalmen vulkaaninen kompleksi	12
2.3. Pyhäsalmen malmion geologia	13
2.4. Tektoniset rakenteet	15
3. KALLIOMEKAANISET OLOSUHTEET	16
3.1. Kallion in situ -jännitystila	16
3.2. Kivien materiaaliominaisuudet	17
3.3. Rakoilu	18
3.3.1 Rakojen syntymekanismi.....	19
3.3.2. Syvämalmion rakoilu	19
3.4. Louhintamenetelmistä	24
3.5. Malmion vajoaminen	26
4. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT	28
4.1. 3D-valokuvausmenetelmä	28
4.2. Aineiston keruu	29
4.3. Aineiston käsittely	30
4.3.1. Rakojen kartoitus	31
4.3.2. Rakennegeologisten havaintojen kartoitus.....	34
4.3.3. Siirtymien analysointi	34
5. TULOKSET	35
5.1. Rakokartoitus	35
5.1.1. Päärakoilu.....	39
5.1.2. Loiva-asteiset rakoiluvyöhykkeet	40
5.1.3. Malmion lounaasta koilliseen lävistävä rakoiluvyöhyke	42
5.1.4. Muita rakoiluhavaintoja	43
5.1.5 Tason 1150 avonainen rako	46
5.2. Rakennegeologinen kartoitus	48
5.2.1. Sulkeumavyöhyke.....	48
5.2.2. Pegmatiittijuonet	52
5.3. Muita havaintoja	60

5.4. Siirtymien seuranta	66
6. TULOSTEN TARKASTELU	73
6.1. Rakohavainnot.....	73
6.2. Malmion lävistävä rakoiluvyöhyke	74
6.3. Muut rakennegeologiset havainnot.....	74
6.4. Siirtymien vertailu	75
7. JOHTOPÄÄTÖKSET	77
8. KIITOKSET	79
9. LÄHTEET.....	80

1. JOHDANTO

1.1. Pyhäsalmen kaivos

Pyhäsalmen kaivos sijaitsee Pyhäjärvellä, Pohjois-Pohjanmaalla. Kaivos tuottaa kupari-, sinkki- ja pyriittirikasteita. Massiivista sulfidimalmia louhitaan vuosittain noin 1,4 miljoonaa tonnia, ja vuonna 2014 keskipitoisuudet olivat: Cu 1,04%, Zn 1,63% sekä S 42,35% (First Quantum Minerals 2014).

Pyhäsalmen malmion löysi 22. elokuuta 1958 Erkki Ruotanen kotipihastaan kaivoa kaivaessaan. Outokumpu Oy aloitti välittömästi geologiset tutkimukset alueella, ja esiintymän osoittauduttua taloudellisesti merkittäväksi päätös kaivoksen avaamisesta tehtiin 29. toukokuuta 1959. Rakennustyöt alkoivat saman vuoden loppukesästä ja kestivät kaksi ja puoli vuotta. Kaivos aloitti toimintansa 1. maaliskuuta 1962. Alkuvaiheessa tuotanto tapahtui avolouhintana, maanalaiseen louhintaan siirryttiin vuonna 1967. Avolouhinta päättyi vuonna 1975. (Luukkonen et. al. 2012).

Vuonna 1996 geologi Timo Mäki löysi uuden malmion 1050-tason alapuolelta intensiivisten malminetsintäkairausten tuloksena. Pyhäsalmen Uusi kaivos –projekti alkoi 1. kesäkuuta 1998 ja malminnosto 1440-metriä syvän Timonkuilun kautta käynnistyi 1. heinäkuuta 2001. (Luukkonen et. al. 2012). Vuoden 2002 alussa Pyhäsalmi Mine Oy siirtyi kanadalaisen Inmet Mining -yhtiön omistukseen, ja edelleen vuonna 2013 First Quantum Minerals Ltd:n omistukseen.

Vuodesta 2001 lähtien louhinta on tapahtunut uuden malmion alueella, tasojen 1050-1425 välillä. Malmi nostetaan hissinostolla tasolta 1410 maanpinnalle. Tuotanto jatkuu nykyisen arvion mukaan vuoteen 2019 asti.

1.2. Vulkaaniset massiiviset sulfidimalmit

Vulkaaniset massiiviset sulfidimalmit (*VMS, volcanogenic massive sulfide ore deposit*) ovat malmeja, joita syntyy merenalaisissa olosuhteissa meren pohjalla. Malmien syntyyn liittyvät

vulkaanisessa ympäristössä vaikuttavat hydrotermiset fluidit, ja malmeja syntyy pääasiassa valtamerten keskiselänteillä ja saarikaariympäristöissä. Vulkaaniset massiiviset sulfidimalmit on perinteisesti luokiteltu metallisisällön mukaan, mutta luokitteluperusteita on muitakin, esimerkiksi Barrien ja Hanningtonin (1999) esittämä ja myöhemmin Franklin et al. (2005) sekä Galley et al. (2007) muokkaama menetelmä, jossa malmit luokitellaan isäntäkiven (host rock) litologian mukaan.

VMS-malmit koostuvat yleensä kahdesta osasta: massiivisesta sulfidimalmista sekä alapuolella sijaitsevasta juoniverkostosta ja pirotteisesta malmista. Alapuolinen juoniverkosto muodostaa yleensä piippumaisen rakenteen, jonka alueella on tapahtunut voimakasta hydrotermistä muuttumista. Yläpuolisen malmion muoto vaihtelee kumpumaisesta laattamaiseen. (Galley et al. 2007).

Yleisimmässä VMS-malmien luokittelussa malmit on jaettu kolmeen kategoriaan metallien määrän perusteella: Cu–Zn-, Zn–Cu- ja Zn–Pb–Cu-ryhmiin (Franklin et al. 1981). Pyhäsalmen malmion katsotaan kuuluvan Zn–Cu-ryhmään, Mullikkorämeen malmion Zn–Pb–Cu-ryhmään. VMS-malmien rakenne on yleensä kerroksellinen, ja metallit esiintyvät usein erillisinä vyöhykkeinä. Rautasulfidit ovat päämineraaleja ja etenkin pyriitti on yleinen. Muita merkittäviä mineraaleja ovat kupariikiisu, sinkkivälke ja lyijyhohde. VMS-malmien jalkapuolella on usein felsisiä vulkaniitteja, kattopuolen kivet ovat usein mafisempia. Kattopuolen kivet voivat koostua myös pääosin sedimenteistä, mikäli VMS-malmio on muodostunut vulkaanisen jakson loppuvaiheessa. (Galley et al. 2007).

VMS-malmioiden hydrotermiset muuttumiskehät ovat yleensä kartion muotoisia. Voimakkainta muuttuminen on yleensä suurinten sulfidimassojen alapuolella ja muuttuminen on vyöhykkeellistä. Kloriittiutuneet ja serisiittiytyneet vyöhykkeet ovat kaikkein yleisimpiä ja ne löytyvät lähes kaikista VMS-malmioista. (Shanks 2012).

1.3. Tutkielman tavoite

Pyhäsalmen kaivoksella on otettu 3D-valokuvia tunneliperistä perien geologisen kartoituksen yhteydessä vuodesta 2012 lähtien. 3D-valokuvat on otettu noin 350 katkosta. Tutkielman tavoitteena on pohtia 3D-valokuvien jatkokäyttöä sekä hyödyntämistä. Tutkielmassa kokeiltiin 3D-kuvien hyödyntämistä malmion tarkemman rakoilumallin

luomisessa. Kuvista voidaan havainnoida rakoilun lisäksi myös muita geologisia rakenteita, ja tutkielman yhtenä tarkoituksena oli kokeilla, pystyykö näitä rakenteita mallintamaan kuvista kolmiulotteisesti. Lisäksi kokeiltiin 3D-valokuvaustekniikan soveltuvuutta kallion liikkeen seurantaan.

Pyhäsalmen kaivoksen syväalmion rakoilua on kartoitettu aiemmin lähinnä peräkartoituksen yhteydessä sekä kairasydännäytteistä. Malmio on kuitenkin rakoillut voimakkaasti lisää yli vuosikymmenen kestäneen louhinnan seurauksena, mistä johtuen vanhat rakokartoitustiedot kaipasivat päivittämistä. Rakoilua kartoitettiin 3D-kuvista WSP Finlandin Surpac-ohjelmistoon kehittämän Structural Suite -lisäosan avulla.

Perinteisessä peränkartoitusmenetelmässä kunkin perän kartoittamiseen varattu aika on rajallinen, ja kaivosolosuhteet tekevät kartoittamisesta haastavaa. Kartoitus suoritetaan käsin ArcPad:iin piirtämällä, jolloin kartoituksen tarkkuus riippuu kulloinkin kartoitusta suorittavasta henkilöstä. Rakenteiden mittaukset suoritetaan geologisella kompassilla, mutta turvallisuussyistä johtuen mittaukset on tehtävä arvioimalla useiden metrien päässä mitattavasta kohteesta. Kartoituksen luotettavuutta on mahdotonta jälkikäteen tarkasti arvioida.

Pyhäsalmen kaivoksella on havaittavissa erittäin runsaasti kallion liikettä. Jäljellä oleva syväalmio on vajonnut jopa kaksi metriä, mikä on havaittavissa useissa louhosperissä malmion ja sivukiven kontaktikohdissa. Koska liike on ollut näin näkyvää, päätettiin kokeilla, pystyykö sitä seuraamaan 3D-valokuvaustekniikan avulla. 3D-valokuvaustekniikkaa ei tietävästi aiemmin ole käytetty kallion liikkeen seurantaan.

2. TUTKIMUSALUEEN GEOLOGIA

2.1. Alueellinen geologia

Pyhäsalmen malmio kuuluu litologialtaan kaakko–luode-suuntaiseen Savon liuskealueeseen. Savon liuskealue on osa svekofennisiä liuskealueita. Liuskealue rajoittuu idässä ja koillisessa karjalaisiin liuskeisiin sekä arkeeseen kratoniin ja länsipuolella Keski-Suomen proterotsooiseen granitoidikompleksiin. (Kähkönen 1998). Aluetta esitelty tarkemmin kuvassa 1.

Svekofennisen liuskealueen kivet kerrostuivat varhaisproterotsooisena aikana merenalaisina turbidiittisedimentteinä ja vulkaanisten kaarien kerrostumina, jotka poimuttuivat ja metamorfoituivat 1900 miljoonaa vuotta sitten svekofennisessä orogeniassa saarikaarten akretoituessa arkeeseen mantereeseen. Orogenian yhteydessä kivien alkuperäiset rakenteet pääosin katosivat, ja pintasyntyisistä kivistä muodostui gneissejä ja migmatiitteja. Kivien alkuperäisiä rakenteita on kuitenkin paikoitellen havaittavissa esimerkiksi metagrauvakoissa, fylliiteissä ja metavulkaniiteissa. (Kähkönen 1998).

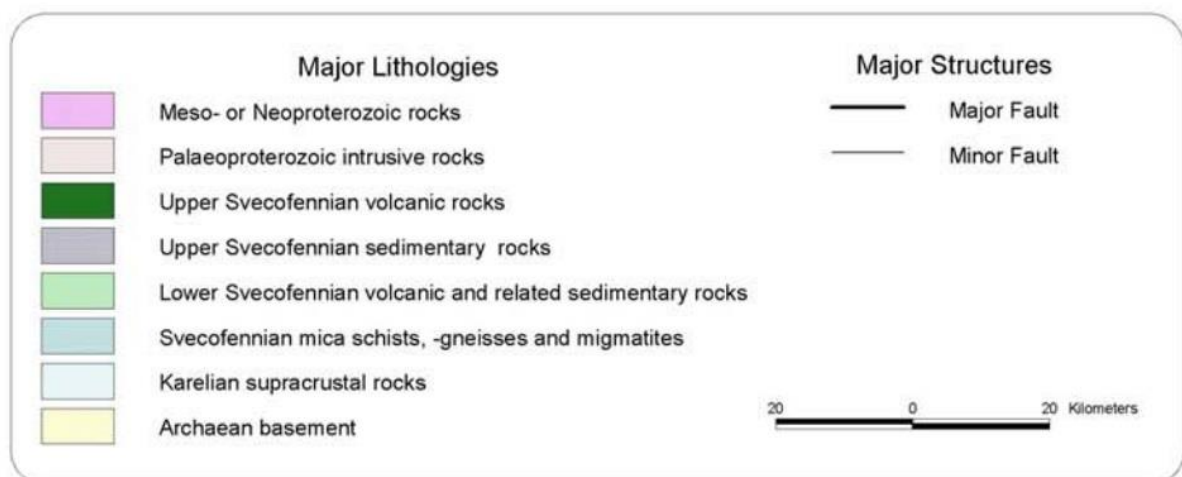
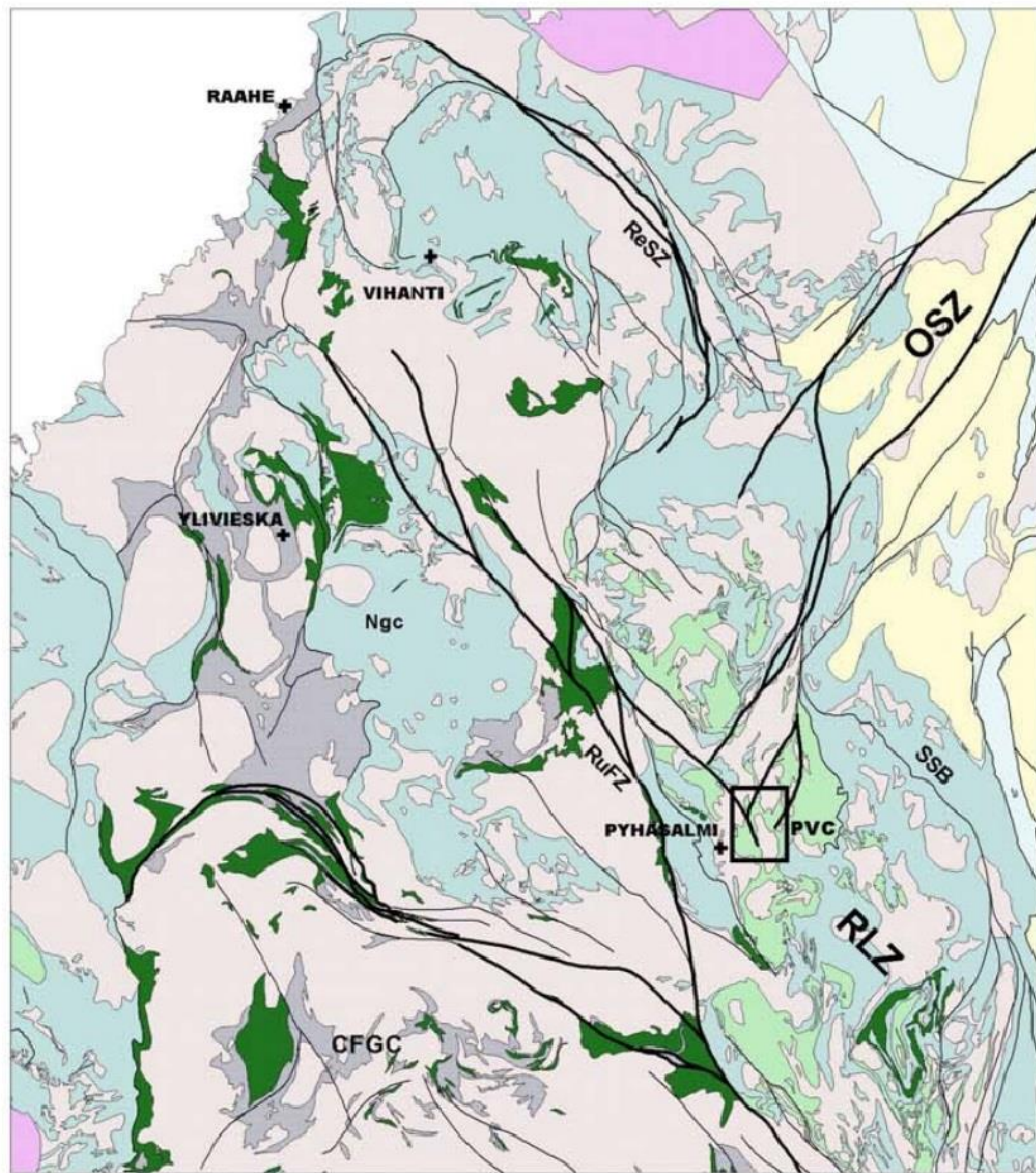
Savon liuskealueen kivet ovat käyneet läpi pääsääntöisesti alhaisen paineen ja keskikorkean tai korkea-asteisen lämpötilan, amfiboliittifasieksen, metamorfoosin. Yleisimpiä kivilajeja ovat turbidiittisyntyiset kiilleliuskeet, gneissit ja migmatiitit. Metavulkaniitteja tavataan Pyhäsalmen, Pielaveden ja Rautalammin seuduilla. Metavulkaniitit ovat enimmäkseen kaarityyppisiä. (Kähkönen 1998). Vulkaaniset kivet esiintyvät alueella pääasiassa kapeina, epäjatkuvinä vyöhykkeinä (Puustjärvi 1999).

Pielaveden ja Pyhäsalmen seudulla on havaittavissa toisiaan muistuttavia kivilajiseurueita. Ekdahlin (1993) mukaan Pielaveden kerrossarja alkaa merenalaisilla metabasalteilla (*Salon* metavulkaniitit), joiden päälle on kerrostunut paksultsi syvänmeren turbidiitteja (*Salonsaaren* sarja). Näitä seuraavat matalammassa vedessä kerrostuneet, silikaattiatinesta sisältävät karbonaattikivet, happamat vulkaniitit, sertit, uraani–fosfori-sedimentit, kvartsiraitaiset rautamuodostumat sekä mustaliuskeet (*Savijärvi* sarja). Seuraava yksikkö sisältää bimodaalisen vulkaniittiseurueen (*Säviän* sarja), jonka yläosan happamiin kiviin liittyy massiivisia sulfidimalmiesiintymiä. Nuorimman yksikön muodostavat turbidiittiset sedimenttikivet (*Koivujoen* sarja), joissa esiintyy välikerroksina 1890-1880 miljoonan

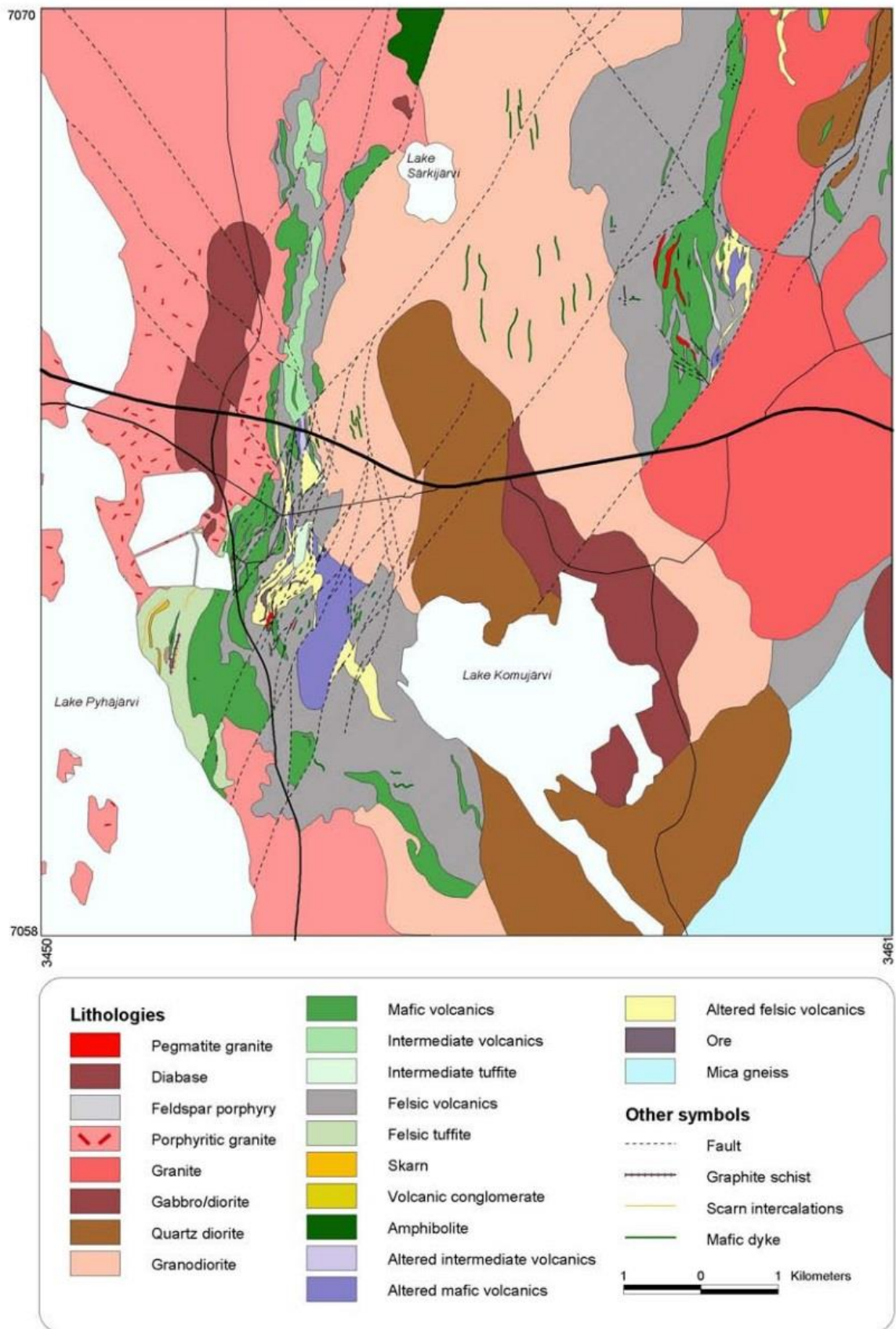
vuoden ikäisiä vulkaniitteja. (Ekdahl 1993, Kähkönen 1998). Säviän sarjan vulkaniitit edustavat kehityksen alkuvaiheessa olevaa saarikaariympäristöä, Koivujoen metavulkaniitit suhteellisen kehittyneessä kaaressa esiintynyttä vulkanismia. Bimodaalinen vulkanismi on Säviän sarjassa liittynyt saarikaaren lyhytaikaiseen repeämisvaiheeseen. (Kähkönen 1998).

Savon liuskealueella on runsaasti siirroksia, jotka jakavat alueen toisistaan poikkeaviin lohkoihin. Liuskealue on käynyt läpi useita deformaatiovaiheita, minkä seurauksena pääosin luoteeseen–pohjoiseen suuntautuvat kerroksellisuudet, juovaisuudet ja liuskeisuudet kaareilevat voimakkaasti. Esimerkiksi Pielaveden seudulla luode–kaakko-, lounas–koillis- ja etelä–pohjois-suuntaiset siirrokset leikkaavat akselitasoltaan pohjois–etelä-suuntaisia toisen poimutusvaiheen antiformeja ja synformeja, joiden akselitasot viettävät 80-50 asteen kulmassa itään päin. Ennen toista deformaatiovaihetta oli muodostunut akselitasoltaan ja siirros­pinnaltaan loiva-asentoisia isokliinisiä poimuja ja ylityöntösiirroksia. (Ekdahl 1993).

Pyhäsalmen malmio sijaitsee alueella, jossa kallioperän tektoniikkaa hallitsevat kaakosta luoteeseen suuntautuva Raahe–Laatokka-siirrosvyöhyke (*RLZ, Raahe-Ladoga Zone*), sekä koilliseen suuntautuva Oulujärven hiertovyöhyke (*OSZ, Oulujärvi Shear Zone*) (Kuva 1) (Puustjärvi 1999). Pyhäsalmen malmio on osa Vihanti–Pyhäsalmi-malmivyöhykettä, johon kuuluu useita massiivisia sulfidimalmiesiintymiä (*VMS, volcanogenic massive sulfide ore deposit*). Vihanti–Pyhäsalmi-malmivyöhyke rajoittuu lounaassa Ruhanperän siirrossvyöhykkeeseen (*RuFZ, Ruhanperä Fault Zone*), ja pohjoisessa ja idässä Revonnevan hiertovyöhykkeeseen (*ReSZ, Revonneva Shear Zone*). Pyhäsalmen malmion on osa vulkaanista kompleksia (*PVC, Pyhäsalmi volcanic complex*), sijainti merkitty kuvaan 1. (Puustjärvi 1999).



Kuva 1. Keski- ja Pohjois-Pohjanmaan geologinen kartta, johon merkitty litologiset alueet, sekä merkittävimmät siirrokset. Tarkempi kartta neliöllä merkitystä alueesta kuvassa 2. Lyhenteiden selitykset: RLZ: Raahe-Ladoga Zone, OSZ: Oulujärvi Shear Zone, RuFZ: Ruhanperä Fault Zone, ReSZ: Revonneva Shear Zone, PVC: Pyhäsalmi volcanic complex, SSB: Savo Schist Belt, CFGC: Central Finland Granitoid Complex, Ngc: Nivala gneiss. Lundqvist et al. (1996) Kuvalähde: Puustjärvi (1999).



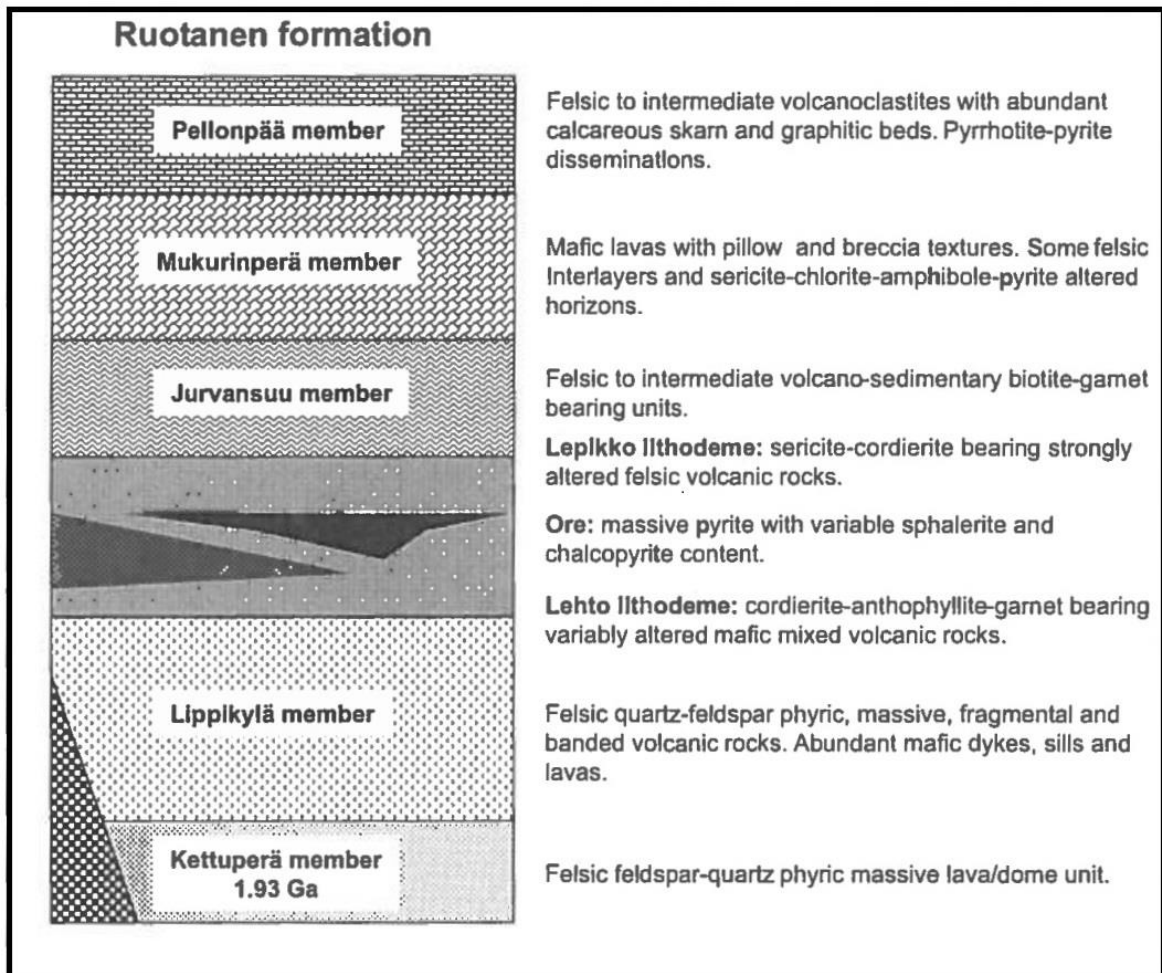
Kuva 2. Pyhäsalmen vulkaanisen kompleksin litologinen kartta. (Puustjärvi 1999).

2.2. Pyhäsalmen vulkaaninen kompleksi

Pyhäsalmen vulkaaninen kompleksi voidaan jakaa Ruotasen muodostumaan lännessä ja Mullikkorämeen muodostumaan idässä. Syntektoniset syväkivet erottavat muodostumia. Ruotanen on pohjois–etelä-suuntainen, 9 km pitkä ja 0,5-4 km leveä vulkaaninen muodostuma, jonka keskivaiheilla Pyhäsalmen kaivos sijaitsee. Mullikkoräme on niin ikään pohjois–etelä-suuntainen, 12 km pitkä ja 2 km leveä vulkaaninen yksikkö. (Puustjärvi 1999).

Pyhäsalmen vulkaanisen kompleksin alimmat osat koostuvat tuffeista ja pyroklastisista laavoista. Mafisia komponentteja on vähän. Ylemmäs siirryttäessä mafiset pyroklastiitit, tyynylaavat ja tyynybreksiat yleistyvät. Metavulkaniitit ovat paikoitellen hyvin säilyneitä, mutta yleisesti hydrotermisissä prosesseissa voimakkaasti muuttuneita ja myöhemmissä vaiheissa deformatuneita. Felsiset kivet ovat enimmäkseen kalkki-alkalisia, alhaisen K-arvon ryoliitteja. (Weihed ja Mäki 1997).

Ruotasen muodostuma on jaettu seitsemään eri jäseneen: Kettuperä, Lippikylä, Lepikon litodeemi, sekä Jurvansuu, Mukurinperä, Pellonpää ja Särkisalo. Mullikkorämeen muodostuma koostuu neljästä jäsenestä: Riitavuori, Reijusnevan litodeemi, sekä Tertinmäki ja Purola. Pyhäsalmen malmio on osa Lepikon litodeemiä. (Puustjärvi 1999). Ruotasen muodostuman stratigrafia esitetty kuvassa 3, vulkaanisen kompleksin litologinen kartta kuvassa 2.



Kuva 3. Ruotasen muodostuman stratigrafia Mäen ja Puustjärven (2003) mukaan.

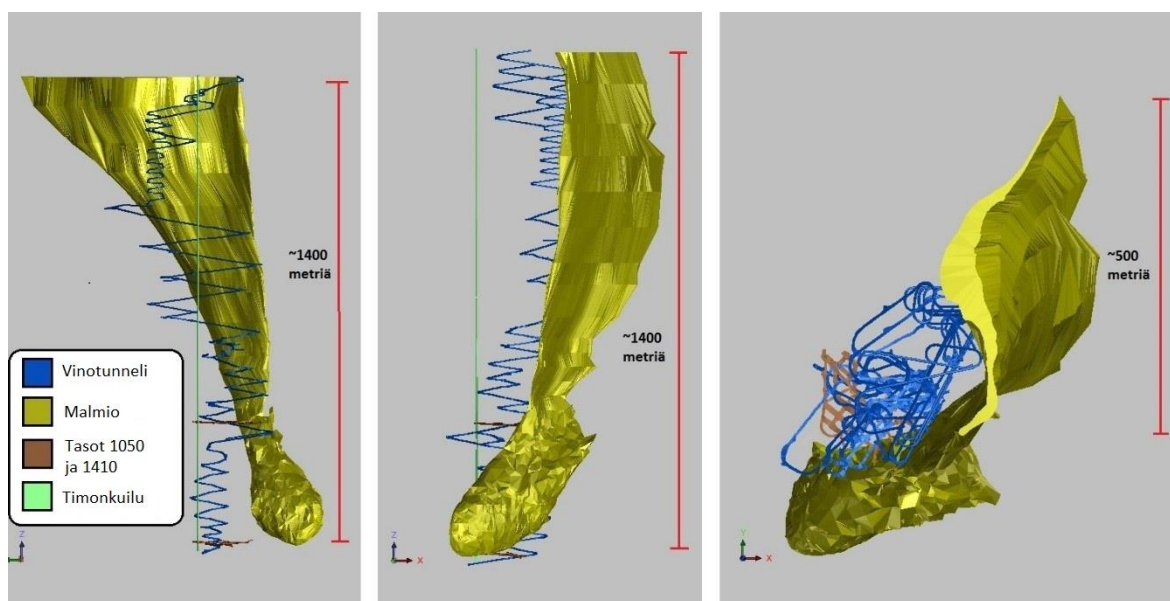
2.3. Pyhäsalmen malmion geologia

Malmio jaetaan kahteen osaan, ylempään malmioon ja syväalmioon. Ylempi malmio on pohjois-etelä-suuntainen, S-kirjaimen muotoinen, ja ulottuu 1100 metrin syvyyteen. Syväalmio on ”perunan” muotoinen, ja ulottuu 1420 metrin syvyyteen (kuva 4). Rakenteellisesti syväalmio sijaitsee synformissa poimurakenteessa. (Puustjärvi 1999).

Malmiota ympäröivät vulkaaniset kivet. Ylempi malmio on ilmeisesti kontaktissa kerrostumisen aikaisiin vulkaniitteihin, toisin kuin syväalmio. Ylempää malmiota ympäröivät kvartsi-muskoviitti-pyriitti-muuttumiskehät. Syväalmiota ympäröivissä kivissä ei juurikaan ole havaittavissa muuttumista, ja malmion kontakti sivukiviin on leikkaava. Vaalean punertavia/harmahtavia pegmatiitteja on havaittavissa sivukivissä ympäri malmiota. (Miettinen 2011).

Syvämalmissa on havaittavissa VMS-malmeille tyypillistä eri metalleista koostuvien vyöhykkeiden esiintymistä. Syvämalmin rakenteita ja geologiaa ovat tutkineet mm. pro gradu -tutkielmissaan Imaña (2003) ja Miettinen (2011). Imaña (2003) luokitteli malmityypit kuuteen eri luokkaan malmien mineralogian, tekstuurin ja geokemian perusteella: massiivinen pyriittimalmi (massive pyrite ore) (MP), laikukas massiivinen pyriittimalmi (spotty massive pyrite ore) (SMP), A-Cu –pyriittimalmi (A-Cu pyrite ore) (AP), uudelleenmobiiloitunut sulfidimalmi (remobilized sulphide ore) (REM), A-sinkkimalmi (A zinc ore) (AZ) ja B-sinkkimalmi (B zinc ore) (BZ). Miettinen (2011) mallinsi eri malmityyppien vyöhykkeellistä esiintymistä 1275-tasolla Imañan luokittelun perusteella. Miettinen tutki myös malmiossa esiintyviä sulkeumia.

Malmion sisäosat koostuvat kupari- ja sinkkiköyhästä massiivisesta pyriittimalmista. Sisäosia ympäröi lähinnä A–Cu-pyriittimalmi, jossa esiintyy laikukkaasta massiivisesta pyriittimalmista koostuvia välikerroksia. Malmion uloimmat kerrokset koostuvat enimmäkseen B-sinkkimalmista. (Imaña 2003). Valtaosa A-sinkkimalmista esiintyy Imañan (2003) mukaan malmiossa havaittavan isokliinisen poimun poimuakselin kohdalla. Uudelleenmobiiloitunut sulfidimalmi esiintyy lähinnä ohuina juonina eri malmityyppien välillä, sekä malmiossa havaittavien mafisten sulkeumien yhteydessä.



Kuva 4. Pyhäsalmen koko malmio sekä Timonkuilu, vinotunneli sekä tasot 1050 ja 1410. Vasemmalla lännestä päin tarkasteltuna, keskellä etelästä päin, ja oikealla ylhäältä päin nähtynä.

2.4. Tektoniset rakenteet

Raahe–Laatokka-siirrosvyöhykkeen kallioperä on monivaiheisen deformaation seurauksena jakautunut siirrostien erottamiin blokkeihin, jotka eroavat toisistaan rakenteiden ja metamorfisen historian perusteella. Alueen kivet ovat käyneet läpi ainakin neljä deformaatiovaihetta, joista kolmas, D_3 , aiheutti aiempien poimurakenteiden kääntymisen vaakasuuntaisista pystymmiksi. D_3 -vaiheen loppupuolella pomuttuminen vaihtui duktiiliksi hierroksi, jonka seurauksena syntyi kaakko–luode-suuntaisia oikeakätisiä siirroksia, esimerkkinä Ruhanperän siirrosvyöhyke ja Revonnevan hiertovyöhyke (kuva 1). (Luukas et al. 1999).

Suurin pääjännitys oli kaakko–luode-suuntainen D_3 -deformaatiovaiheen aikaan (Kärki et al. 1993). D_4 -vaiheen aikaan suurimman pääjännityksen suunta vaihtui pohjoisesta etelään. Oulujärven hiertovyöhyke muodostui ilmeisesti tässä vaiheessa koillis–lounas-suuntaan, mikä aiheutti myös Ruhanperän ja Revonnevan vyöhykkeiden uudelleenaktivoitumisen. Oulujärven hiertovyöhykkeen lounaisimmat osat ulottuvat Pyhäsalmen alueelle asti (kuva 2). Ylempi malmio on D_4 -vaiheen aikana sijainnut keskellä vasenkätistä hiertovyöhykettä, mikä on aiheuttanut ylemmän malmion muotoutumisen S-kirjaimen muotoon (Luukas et al. 1999).

Malmiota ympäröivät pegmatiitti-graniitit liittyvät ilmeisesti D_4 -vaiheeseen. Pegmatiitit tunkeutuivat jo olemassa olleisiin vetojännityksen synnyttämiin rakoihin siirrostumisvaiheen loputtua. Samassa yhteydessä tapahtui ilmeisesti myös malmion viimeisin uudelleenmobiiloituminen ja -kiteytyminen. (Luukas et al. 1999).

Malmion sisällä on havaittavissa poimurakenteita, joita ovat kuvailleet ainakin Luukas et al. (1999), Imaña (2003) sekä Miettinen (2011). Alueella on havaittavissa myös monenlaisia siirroksia sekä hiertovyöhykkeitä. Malmion rakennegeologiasta ei kuitenkaan ole tehty yhtäkään kattavaa julkaisua, ja osin tulkinnat rakenteista ovat kiistanalaisia.

3. KALLIOMEKAANISET OLOSUHTEET

Kalliomekaanisten olosuhteiden tuntemus on välttämätöntä kaivoksen suunnitteluvaiheessa. Osittain kalliomekaanisten olosuhteiden perusteella valitaan muun muassa louhintamenetelmä, suunnitellaan mahdollisesti optimaalinen louhoskoko ja -muoto, sekä mitoitetaan kallion lujitus optimaaliseksi. Kalliomekaaniset olosuhteet on tunnettava myös kalliomassan käyttäytymistä ja louhinnan vaikutusta kalliomassaan mallinnettaessa. (Syrjänen et al. 2008).

3.1. Kallion in situ -jännitystila

Kallioperän jännitystila on seurausta maapallon kuoren ja vaipan yläosassa vaikuttavista laattatektonisista voimista ja kallioperän painosta. Siihen vaikuttavat kallion rakenteet ja kuormitushistoria, eikä jännitysten suuntaa voi varmistaa muuten kuin mittauksin. Kallion louhinta vaikuttaa jännitysten suuntiin ja jännitykset välittyvät eteenpäin vain kiinteän materiaalin lävitse. (Syrjänen et al. 2008)

Pääjännityksiä on kolme kappaletta, ja ne sijaitsevat kohtisuorissa suunnissa toisiinsa nähden. Suurin pääjännitys ilmaistaan suurella σ_1 , keskimäinen pääjännitys on σ_2 ja pienin pääjännitys on σ_3 . Voidaan käyttää myös suureita suurin vaakajännitys σ_H , pienin vaakajännitys σ_h ja pystyjännitys σ_v . Suomessa pystyjännitys on yleensä myös pienin pääjännitys. Jännitys lasketaan voima / pinta-ala, yksikkönä on pascal ($\text{Pa} = \text{N} / \text{m}^2$). Kallion jännitystilän käyttöyksikkö on MPa, mikä vastaa 1 000 000 pascalia. Pystyjännitys vastaa yleensä kallion painoa. Vaakajännitys on yleensä suurempi kuin pystyjännitys, jännitysten suhde riippuu syvyydestä. Suomessa suurimmat jännitykset ovat lähes vaakasuoria ja noin kaksi kertaa suurempia kuin pystyjännitykset. Pääjännitys on Suomessa yleensä kaakko-luode-suuntainen. (Syrjänen et al. 2008).

Tietoa kallion jännitystilasta on käytetty Pyhäsalmen kaivoksella muun muassa louhosten suuntauksen suunnittelussa. Jännitystilamittauksia on tehty syväalmion alueella ja sen läheisyydessä vuosituhanen vaihteessa, sekä vuonna 2014 Laguna-hanketta varten (Ledger 1999, Mononen 2000, Hakala ja Heine 2014). Suurimman in situ -vaakajännityksen (σ_H)

suunta on noin 295°–310° (Hakala ja Heine 2014). Tasoilla 1125 ja 1430 mitatut jännitykset on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1. In situ -jännitykset tasoilla +1125 ja +1430, sekä jännitysten suunnat. (Ledger 1999, Hakala ja Heine 2014)

	+1125	+1430
Suurin vaakajännitys σ_H	65–68 MPa (303°–314°)	72 MPa (295°–310°)
Pienin vaakajännitys σ_h	35–46 MPa (213°–224°)	44 MPa
Pystyjännitys σ_v	29–34 MPa	43 MPa

3.2. Kivien materiaaliominaisuudet

Yksittäisen kiven ja kalliomassan materiaaliominaisuudet poikkeavat suuresti toisistaan. Kivinäyte voi olla koosta riippuen suhteellisen homogeeninen, ja koostua esimerkiksi kokonaan samasta kivilajista. Kalliomassa puolestaan voi koostua useista eri kivilajeista, joiden materiaaliominaisuudet poikkeavat toisistaan. Kalliomassassa on yleensä myös erilaisia rakoja ja heikkousvyöhykkeitä, jotka puuttuvat yksittäisestä kivinäytteestä. Eri kivilajien materiaaliominaisuuksien tuntemus on kuitenkin välttämätöntä kalliomassan käyttäytymistä mallinnettaessa. Kalliomassaa arvioitaessa huomioidaan muun muassa mahdolliset eri kivilajit ja niiden materiaaliominaisuudet, tektoniset rakenteet, kallion rakoilu, mahdollinen kalliopohjavesi sekä jännitystilat. (Syrjänen et al. 2008)

Kiven materiaaliominaisuuksia voidaan tutkia erilaisilla laboratoriokokeilla. Yksiaksiaalinen puristusmurtokoe on menetelmä, jolla saadaan selvitettyä kivilajin puristusmurtolujuus σ_c . Puristusmurtokokeen tuloksia hyödyntäen voidaan laskea esimerkiksi näytteen kimmomoduuli E ja poissonin luku ν . Vetomurtolujuus σ_t saadaan selvitettyä esimerkiksi brasilian-kokeen avulla. Kolmiaksiaalisella puristuskokeella saadaan Mohr-Coulombin-murtokriteerin parametrit koheesio c ja kitkakulma ϕ . (Syrjänen et al. 2008)

Pyhäsalmeilla syvämalmin sekä sivukiven materiaaliominaisuuksia on selvitetty yksiaksiaalisilla puristuskokeilla sekä brasilian-kokeilla (Hakala et. al. 1998, 1999). Yhteenveto eri kivilajien materiaaliominaisuuksista esitetty taulukossa 2. Puristuslujuus kertoo kiven lujuudesta, kimmomoduuli kiven jäykkyydestä tai taipuisuudesta. Huomionarvoista on kuparimalmin korkea lujuus ja jäykkyys verrattuna sinkkimalmiin, sekä sivukivien huomattavan korkea lujuus mutta alhainen jäykkyys malmikiviin verrattuna, eli sivukivi käyttäytyy oletettavasti elastisemmin kuin malmikivi. (Struthers 2005). Malmin tiheys on keskimäärin 4400 kg/m^3 , ja sivukiven noin 2700 kg/m^3 . Vaihtelua on paljon varsinkin malmikivissä. (First Quantum Minerals 2014). Pegmatiittien laatu vaihtelee, jotkin ovat hapettuneita, muuttumattomat pegmatiitit ovat kohtuullisen lujia mutta hyvin hauraita (Struthers 2005).

Taulukko 2. Yhteenveto eri kivilajien materiaaliominaisuuksista. (Hakala et. al. 1998, 1999).

	Puristuslujuus σ_c	Vetolujuus σ_t	Kimmomoduuli E	Poissonin luku ν
Vulkaniitti, felsinen	241 MPa	17 MPa	68 GPa	0,24
Vulkaniitti, mafinen	206 MPa	15,2 MPa	76 GPa	0,26
Pegmatiitti	119 MPa	6,8 MPa	63 GPa	0,23
Sinkkimalmi	92 MPa	5,9 MPa	98 GPa	0,32
Kuparimalmi	123 MPa	6,1 MPa	139 GPa	0,30
Pyriittimalmi	93 MPa	6,4 MPa	120 GPa	0,34

3.3. Rakoilu

Rakoilun tuntemus on yksi tärkeimmistä asioista suunniteltaessa kallion tuentaa. Kallion raoilla on suuri vaikutus kalliomassan lujuusominaisuuksiin. Rakojen kartoituksessa kiinnitetään yleensä huomiota rakopintojen karkeuteen, rakojen jatkuvuuksiin, mahdollisiin rakotäytteisiin, rakojen suuntiin sekä rakojen määrään kalliossa tutkittavalla alueella. Myös rakoilun seurauksena kallioon muodostuvien lohkojen muoto voidaan ottaa kartoituksessa huomioon. Kalliomassan laadun arviointia varten on kehitetty useita erilaisia luokitusmenetelmiä, joissa kallion laatua arvioitaessa voidaan ottaa huomioon myös muun muassa rakojen suunta louhittavaan kalliotilaan nähden. (Syrjänen et al. 2008).

3.3.1 Rakojen syntymekanismi

Maankuoreen kohdistuvat jännitystilat saavat aikaan kallion deformaatiota. Maankuoren pintaosissa deformaatio on haurasta ja aiheuttaa kallion rikkoutumista, mistä seuraa rakoja ja siirroksia. Siirryttäessä maankuoreessa syvemmälle lämpötila ja paine kasvavat, jolloin deformaatio muuttuu plastiseksi. Kallio alkaa muovautua särkymättä ja syntyy esimerkiksi liuskerakenteisia kivilajeja, sekä rakenteiden poimuttumista. (Kähkönen ja Lehtinen 1998).

Rakojen syntyy, kun kallion jännitystila ylittää kalliomassan lujuuden. Puristavaa jännitystä kallio kestää yleensä hyvin, mutta vetojännitystä ei juuri lainkaan. Raot voidaankin syntytapansa perusteella jakaa kahteen luokkaan: vetoraot ja leikkausraot. Vetoraot syntyvät pienintä pääjännitystä σ_3 vastaan kohtisuorassa suunnassa. Leikkausraoja syntyy, kun kolmiakselinen jännitystila ylittää kiven lujuuden, ja rakoilun suunta määräytyy kivimateriaalin sisäisen kitkakulman ja pääjännitysten perusteella. Syntyvien rakojen suunta voidaan karkeasti arvioida eri myötökriteereiden perusteella, esimerkiksi Mohr-Coulombin- tai Hoek-Brownin -murtokriteerin avulla. (Syrjänen et al. 2008)

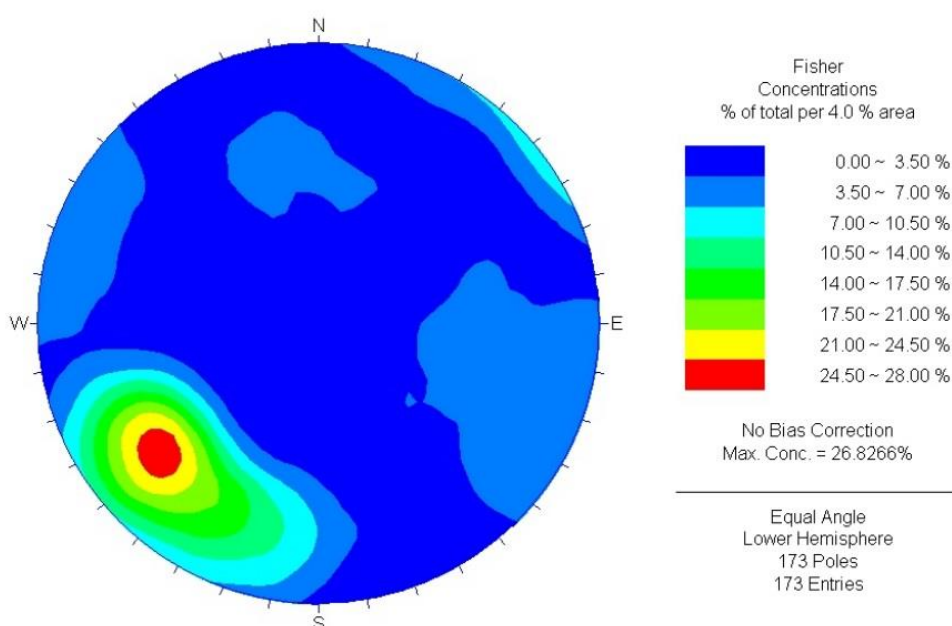
Mattilan (2015) väitöskirjan mukaan Olkiluodon alueella kallioperässä havaittavat rikkonaiset rakenteet muodostuivat 600 miljoonan vuoden ajanjaksolla kallioperän synnyn jälkeen. Mattilan mukaan Olkiluodon alueella ei ole muodostunut uusia rikkonaisia rakenteita tämän jälkeen, vaan kaikki nykyiset hauraat rakenteet ovat yli 1,2 miljardin vuoden ikäisiä. Mattila havaitsi myös, että seismiset tapahtumat keskittyvät Olkiluodon alueella jo olemassa oleviin rikkonaisiin rakenteisiin. Alueen kallioperän myöhempi deformaatio on tapahtunut jo olemassa olevien rikkonaiden rakenteiden uudelleenaktivoitumisen kautta.

3.3.2. Syvämlmion rakoilu

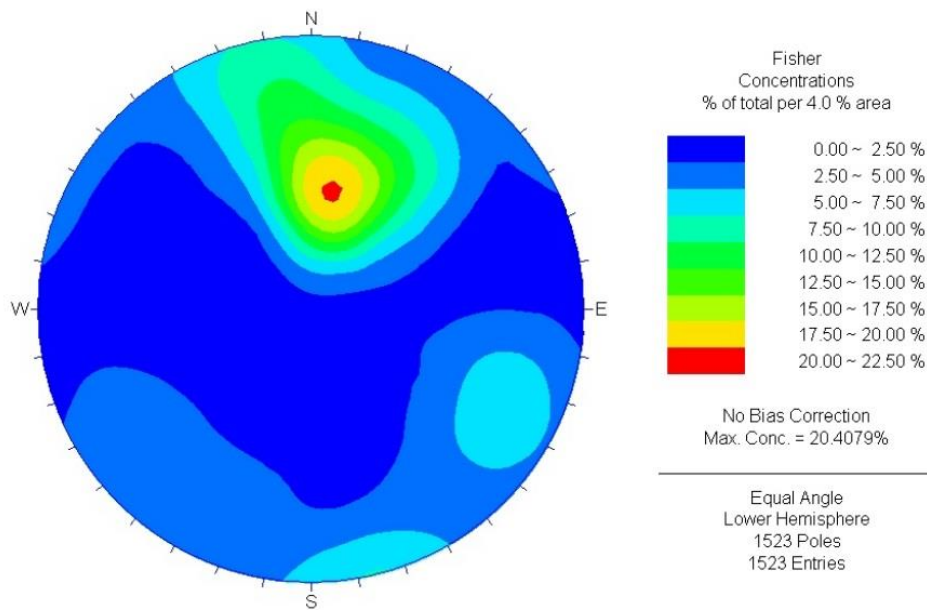
Pyhäsalmissa syvämlmion rakoilua on tutkittu vuosituhanen vaihteessa, ennen syvämlmion louhinnan aloittamista. Syvämlmio oli louhinnan alkuvaiheessa hyvin ehjää. Vuonna 2005 tehdyn selvityksen perusteella malmiossa oli havaittavissa vain yksi selvä rakosuunta, jonka suunta oli karkeasti kaakosta luoteeseen, rakojen kaateen ollessa noin 70° koilliseen päin (Kuva 5). Sama rakoilu oli heikosti havaittavissa myös sivukivessä (Kuva 6). Sivukivessä oli voimakkaimmin havaittavissa rakoilua suunnassa 185/43 (kaateen suunta/kaade). Havainnot keskittyvät ilmeisesti malmion pohjoispuolelle, ja sivukiven

päärakosuunta kuvaa lähinnä liuskeisuuden suuntaa malmion pohjoispuolella. (Struthers 2005).

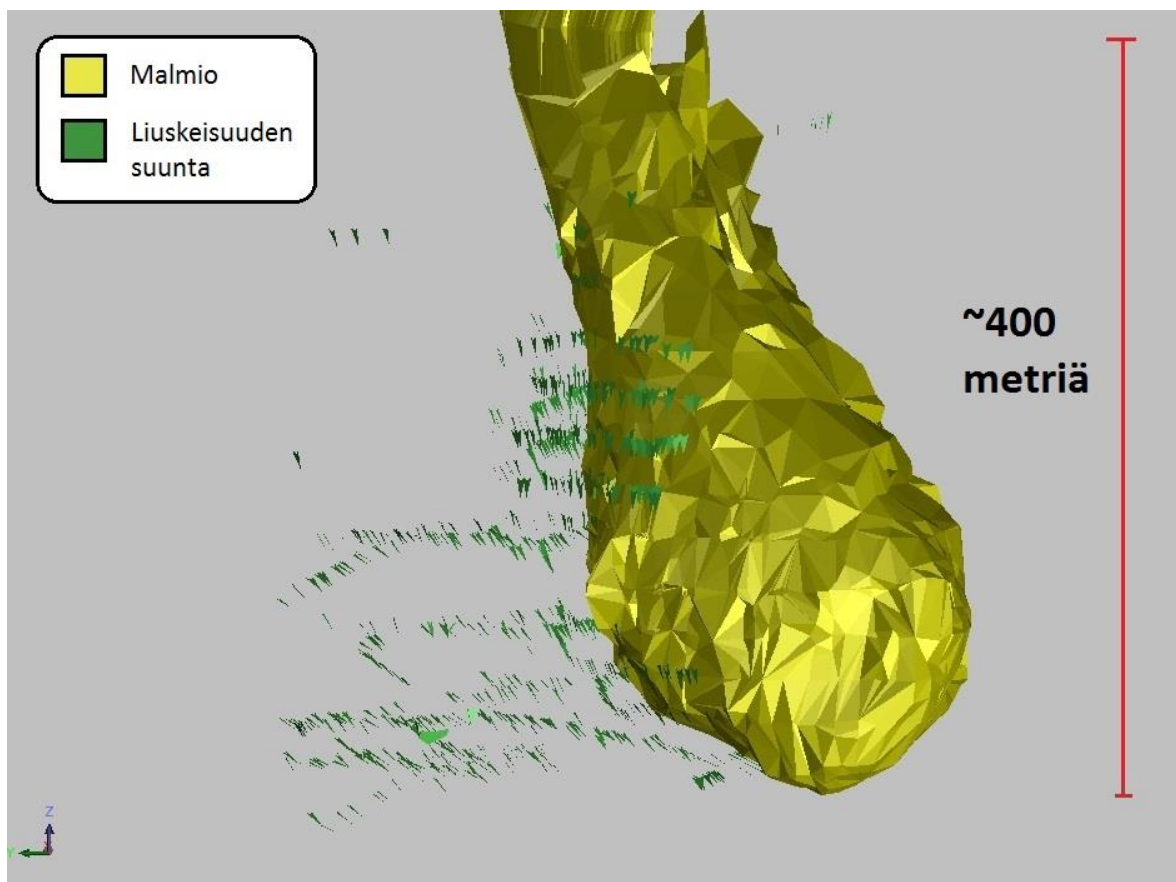
Sivukiven rakoilua on kartoitettu peräkartoituksen yhteydessä ja kairasydännäytteistä. Sivukivi on rakoillut ennenkaikkea liuskeisuuden suuntaisesti ja liuskeisuus myötäilee malmion muotoja. Sivukivi on pahimmillaan rakoillut hyvin tiheästi, rakovälin ollessa vain joitakin senttejä. Havaintoja sivukiven rakoilusta ja liuskeisuuden suunnista on lähinnä malmion pohjoispuolelta, sivukiven liuskeisuuden suuntia on esitetty kuvassa 7.



Kuva 5. Pyhäsalmen malmion puolella esiintyvä rakoilu. Alapalloprojektio, jossa esitettyinä rakojen navat. Rakohavaintojen määrä 173 kpl. (Struthers 2005)

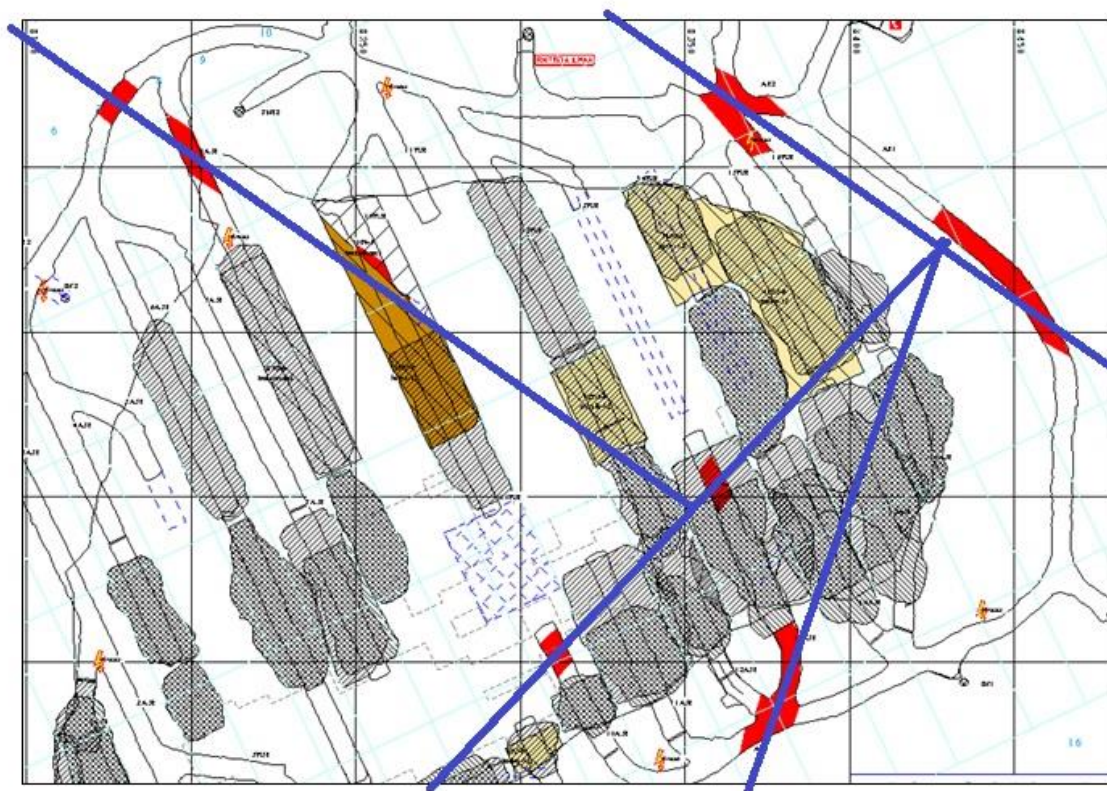


Kuva 6. Pyhäsalmen malmion sivukiven puolella esiintyvä rakoilu. Alapalloprojektiio, jossa esitettynä rakojen navat. Rakohavaintojen määrä 1523 kpl. Malmiossa on myös heikosti havaittavissa sivukiven päärakosuunnan mukaista rakoilua. (Struthers 2005)

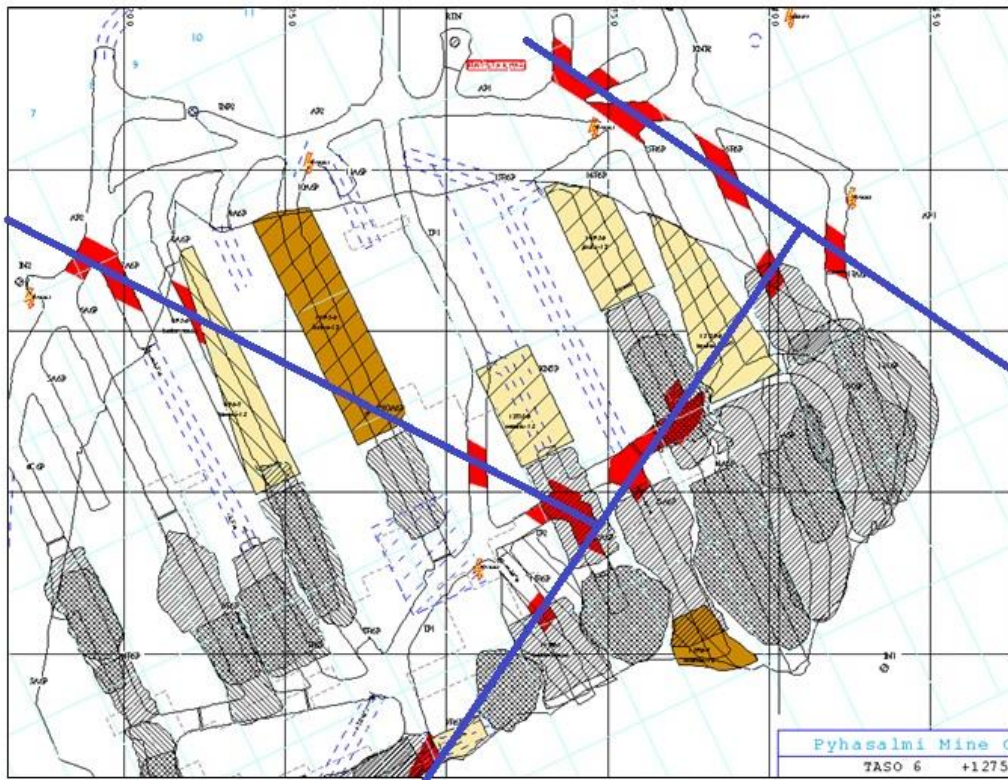


Kuva 7. Sivukiven liuskeisuuden suuntia peräkartoituksen/kairasydännäytteiden perusteella. Katselusuunta noin lännestä itään päin.

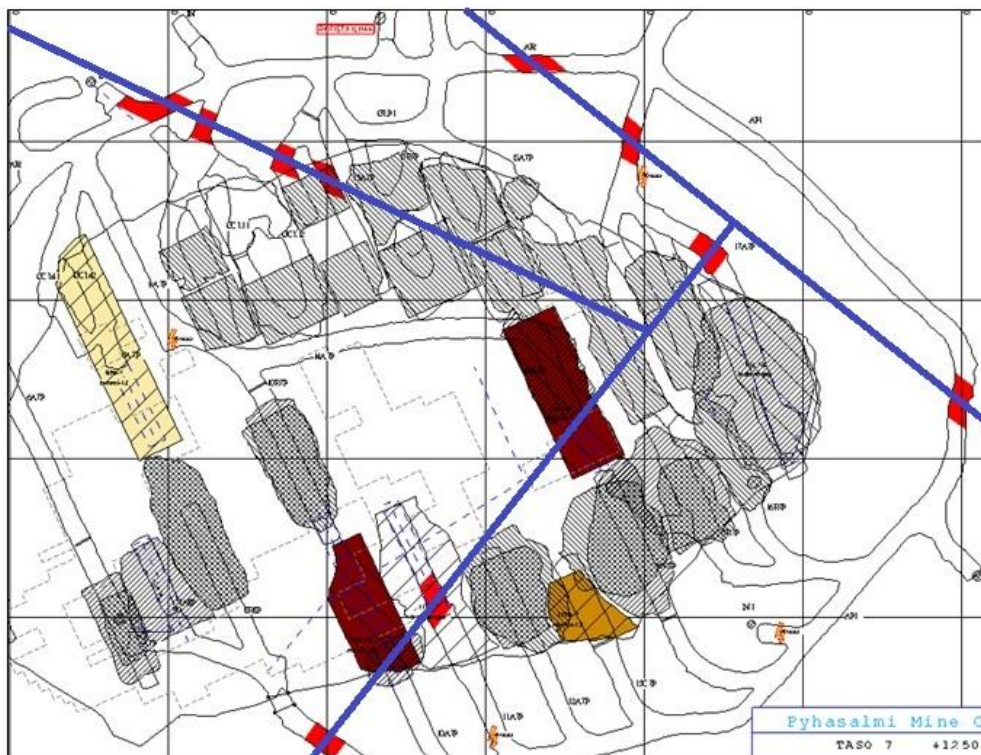
Pyhäsalmen kaivoksella on ollut oma seismisten tapahtumien havainnointiverkko vuodesta 2002 lähtien. Seismistä aktiivisuutta on esiintynyt malmion alueella ja läheisyydessä erittäin runsaasti. Vuonna 2011 Bergström mallinsi seismisten havaintojen avulla malmion seismisesti aktiivisia rakenteita. Joitakin Bergströmin mallintamia rakenteita tasoittain on esitetty kuvissa 8-10. Raportin mukaan vuonna 2011 pahiten vaurioituneita tasoja ovat olleet +1375 ja +1250 -väliset tasot, ylemmillä tasoilla rakenteiden tulkitseminen seismiikan avulla on ollut haasteellista.



Kuva 8. Seismisesti aktiiviset rakenteet merkattu sinisellä paksulla viivalla, 1300-taso. Louhitut louhokset merkattu harmaalla, ruskean eri sävyillä louhintaan tulevia louhoksia. Punaisella merkityillä alueilla korkea seisminen riski. (Bergström 2011)



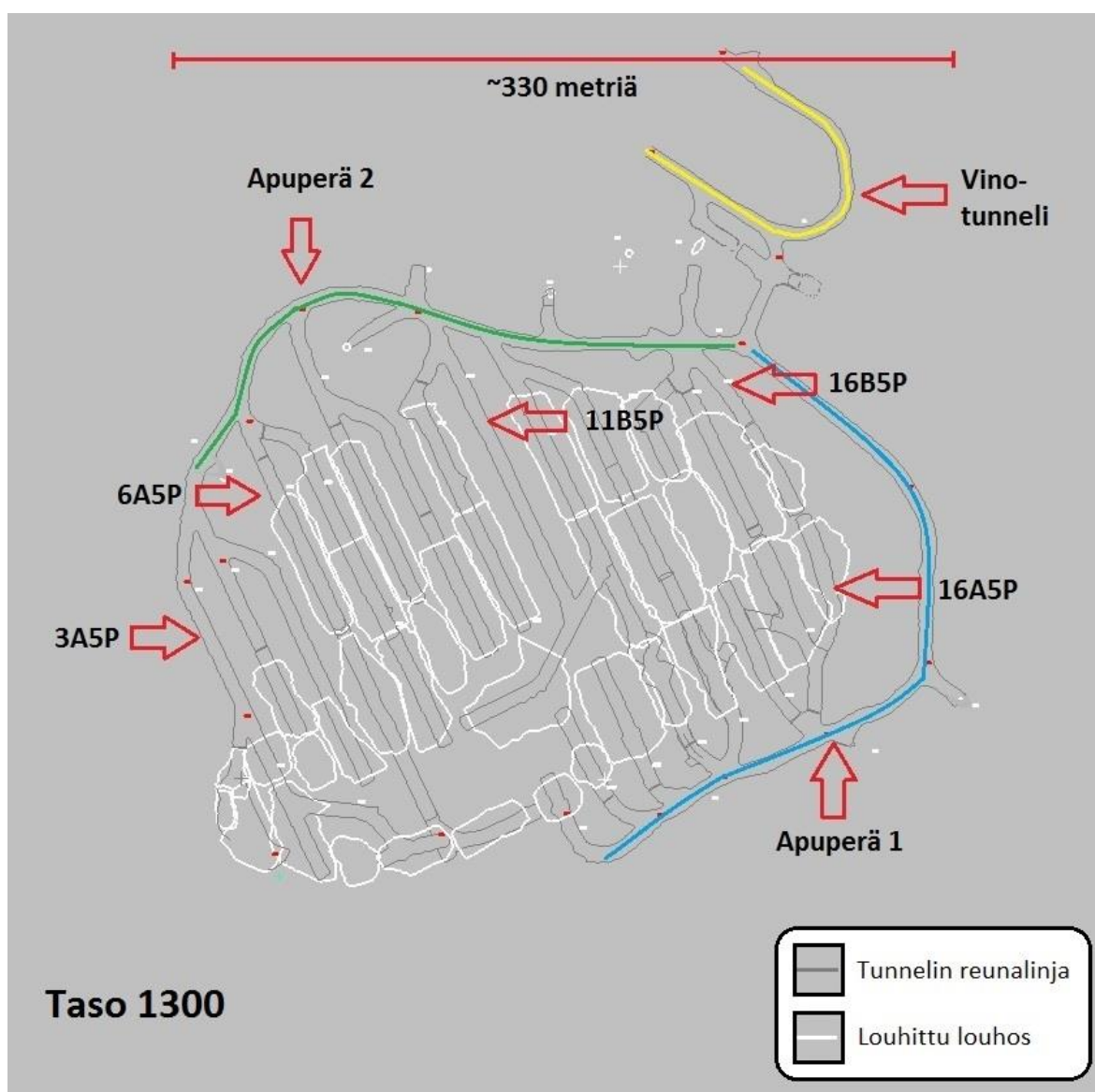
Kuva 9. Seismisesti aktiiviset rakenteet merkattu sinisillä viivoilla, tasolla 1275. Louhitut louhokset merkattu harmaalla, ruskean eri sävyillä louhintaan tulevia louhoksia. Punaisella merkityillä alueilla korkea seisminen riski. (Bergström 2011)



Kuva 10. Seismisesti aktiiviset rakenteet merkattu sinisillä viivoilla, tasolla 1250. Louhitut louhokset merkattu harmaalla, ruskean eri sävyillä louhintaan tulevia louhoksia. Punaisella merkityillä alueilla korkea seisminen riski. (Bergström 2011)

3.4. Louhintamenetelmistä

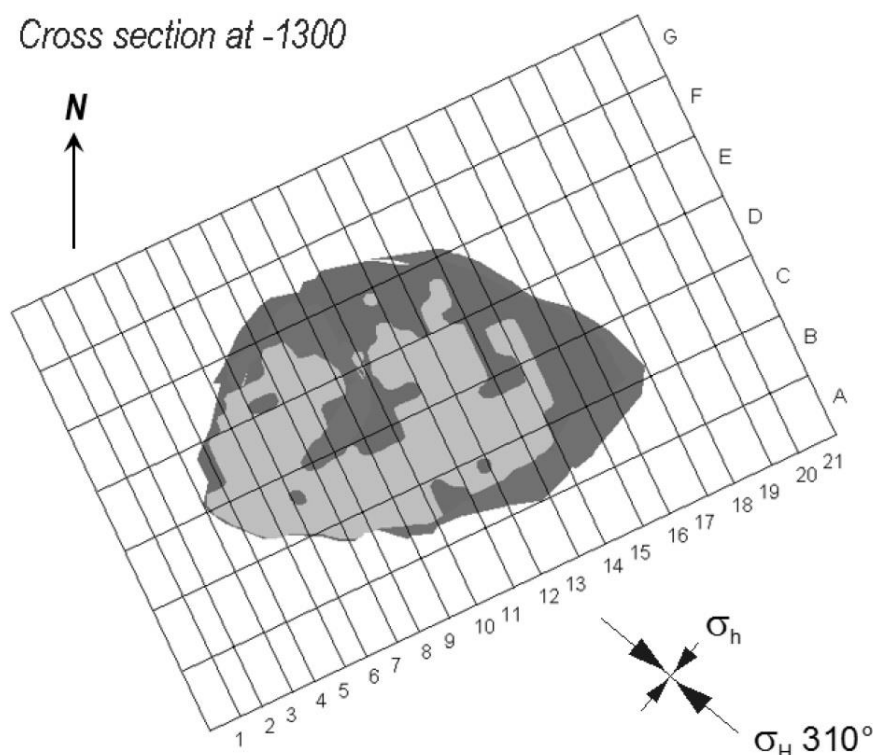
Vinotunneli sijaitsee Pyhäsalmen syväalmion pohjoispuolella. Syväalmio on jaettu louhintatasoihin, joiden tasoväli on 25 metriä. Louhintataso koostuu malmiota kiertävistä apuperistä, sekä malmioon menevistä louhosperistä, jotka nimetään profiileittain. Kunkin profiili kulkee läpi almin samassa kohdassa, jolloin 'päällekkäiset', eri tasoilla sijaitsevat louhokset sijaitsevat samalla profiililla. Louhosperien nimeämiseen käytetty ristikko näkyvissä kuvassa 12. Tyypillinen louhostaso esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Tyypillinen tasokartta Pyhäsalmen kaivoksesta. Apuperät ympäröivät malmiota, louhosperät haarautuvat apuperistä malmioon. Muutamien louhosperien nimet merkitty näkyviin esimerkin vuoksi.

Malmia louhitaan Pyhäsalmeella pengertäyttölouhintamenetelmällä. Aikaisemmin myös välitasolouhintamenetelmä oli käytössä. Malmion louhinta aloitettiin malmion pohjalta ensimmäisen vaiheen louhoksilla, joiden väliin jätettiin pilarit. Pilarit louhitaan toisen vaiheen louhoksina. Ensimmäisen vaiheen louhokset suunniteltiin täytettäväksi kovettuvalla täytöllä, toisen vaiheen louhoksiin suunniteltiin kovettumatonta täyttöä. (Bergström et al. 2014)

Korkeista jännitystiloista johtuen louhinta suunniteltiin aloitettavaksi keskeltä malmion pohjaa. Tuotannon oli tarkoitus laajeta yhtäaikaaisesti sivuille ja ylöspäin nuolimaisessa muodossa. Louhokset suunnattiin 30° asteen kulmaan pääjännitykseen nähden (Kuva 12). Ensimmäisen vaiheen louhosten väliin jäävien pilarien oli tarkoitus toimia myötäävinä pilareina (*yielding pillar*), ja niiden oli tarkoitus kerätä jännityksiä ja myödetä ensimmäisen vaiheen louhosten louhinnan ajan. Ensimmäisen vaiheen louhosten leveys oli 15-18m ja toisen vaiheen louhosten 20-25m. Louhoskorkeus oli 25m tai 50m. (Bergström et al. 2014)



Kuva 12. Leikkauskuva tasolta 1300 jossa näkyvät suunnitellut profiilit, sekä suurimman ja pienimmän vaakajännityksen suunta. Pohjalla olevaa ristikkoa on käytetty louhosten nimeämiseen. Eri malmityypit eroteltu harmaan eri sävyillä. (Bergström et al. 2014)

Ensimmäisen vaiheen louhoksia louhittaessa louhosten väliin jäävät pilarit alkoivat hilseilemään ja tapahtui kallioräiskettä, eli kallion äkillistä ja rajua särkymistä kivilajin joutuessa sen lujuuden ylittävän kuormituksen alaiseksi. Pilarit kapenivat keskikohdistaan ja louhoksista tuli tynnyrin muotoisia. Pilarien myötäämisestä kaikilla alueilla ei kuitenkaan ollut varmuutta. (Bergström et al. 2014)

Ensimmäisten toisen vaiheen louhosten louhiminen sujui ongelmitta, seismisyyttä ja vaurioita havaittiin yleensä vain malmion reunaosissa, sivukiven kontaktissa. Malmion etelä- ja länsiosien pilarit olivat kuitenkin huomattavan rakoilleita verrattuna kiven laatuun ensimmäisen vaiheen louhosten louhinnan aikaan. Seismisyyttä oli alun perin havaittu lähinnä louhosten läheisyydessä, mutta sittemmin seismisyys on vaiheittain siirtynyt malmion ulkopuolelle. Nykyään seismisiä tapahtumia ei enää juurikaan havaita jäljellä olevan malmion alueella. (Bergström et al. 2014)

Syvämalmien louhinnan alkuvaiheessa oli mahdollista käyttää 50 metrin louhoskorkeutta korkeista jännitystiloista huolimatta, koska malmio oli suhteellisen ehyttä kiveä. Sittemmin louhoskorkeus laskettiin 25 metriin, louhosten leveyden ollessa nykyisin noin 15-25 metriä. Louhosten pituus vaihtelee. Keskimääräinen louhoskoko on nykyisin noin 70 000 tonnia, mutta aiemmin jopa yli 100 000 tonnin louhokset olivat yleisiä. Malmion pohjaosat on pääpiirteissään jo louhittu, ja nykyään kaikkien louhosten täytössä käytetään kovettuvaa täyttöä. (Bergström et al. 2014)

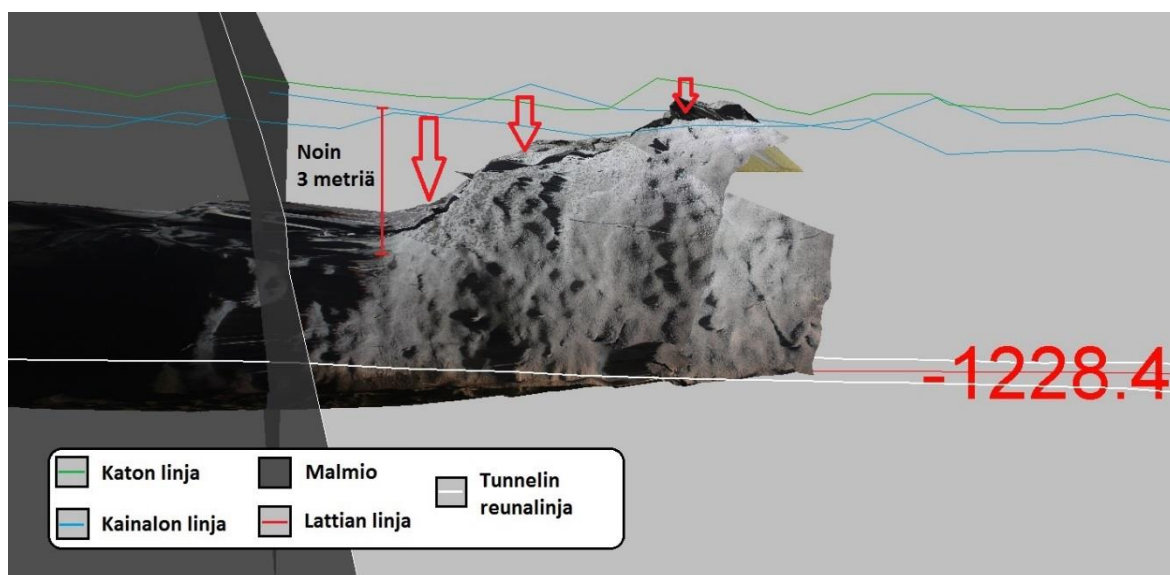
3.5. Malmion vajoaminen

Vuonna 2009 havaittiin malmion läntisellä kattopuolella seisminen keskittymä. Samana vuonna havaittiin ensimmäiset viitteet malmion mahdollisesta vajoamisesta sivukiven kontaktia pitkin. Keväällä 2011 saatiin varmistus malmion vajoamisesta, kun huomattiin ensimmäiset siirtymät malmion ja sivukiven kontaktikohdissa. (Pyhäsalmi Mine Oy 2014).

Vajoaminen on havaittavissa selvimmin malmion läntisissä osissa, mutta liikettä tapahtuu mahdollisesti myös malmion itäisemmissä osissa. Malmion luoteisosissa liike on ollut kaikkein suurinta. Malmion itäosien liike on ollut paljon hillitympää, paikoitellen liikettä ei ole mahdollisesti tapahtunut lainkaan. (Bergström et al. 2014)

Vuonna 2013 tehdyn jännitystilamallinnuksen mukaan malmion läntisen kattopuolen jännitykset myötäävät vuonna 2014, minkä seurauksena kattopuoli alkaa vajota. Raportin mukaan myös malmion jännitykset myötäävät samana vuonna, mistä seuraa louhosten stabiliteettiongelmia. (Lamberg et al. 2013)

Malmion vajouma on havaittavissa lähinnä malmin ja sivukiven kontaktikohdassa, johon on paikoitellen muodostunut lähes parin metrin pudotus siirryttäessä tunnelissa sivukiven puolelta malmion alueelle (Kuva 13). Vajouman suuruuden arviointi on haastavaa, koska kontaktikohtia on jouduttu rusnaamaan ja rappaamaan toistuvasti.



Kuva 13. 3D-valokuva kontaktikohdasta tasolta 1225, louhosperästä 9. Malmio kuvassa vasemmalla (tumman harmaa). Siniset ja vihreät viivat ovat alkuperäisiä, peränaajon yhteydessä mitattuja katon ja kainaloiden linjoja, kun taas 3D-valokuva on otettu vuonna 2015. Alkuperäisten linjojen ja 3D-valokuvan avulla mitattuna tunnelin katto on tippunut pahimmillaan lähes kolme metriä.

4. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT

4.1. 3D-valokuvausmenetelmä

Fotogrammetria on menetelmä, jossa 2D-valokuvien avulla luodaan kuvattavasta kohteesta kolmiulotteisia malleja, joista voidaan tehdä kolmiulotteisia mittauksia. Fotogrammetriassa pyritään määrittämään kuvan ja kohteen välinen geometrinen suhde kuvanottohetkellä. Tätä varten kuvattavasta kohteesta, esimerkiksi tunnelin seinästä, täytyy ottaa vähintään kaksi kuvaa samasta kohdasta, mutta eri suunnista. Tämän jälkeen on mahdollista määrittää kuvien parallaksit, eli toisiaan vastaavien pisteiden väliset erot. (Mikhail ja Bethel 2001). Näin ollen perästä tarvitaan vähintään kaksi valokuvaa 3D-valokuvan luomista varten. Tällaisissa tapauksissa 3D-kuvan pystyy yleensä tekemään vain perän takaseinästä, ja tarkkuus on huono. Optimitilanteessa perästä otetaan 16 valokuvaa, jolloin myös seinistä ja katosta saadaan luotua tarkat 3D-valokuvat.

Valmis 3D-malli voidaan sijoittaa haluttuun koordinaattijärjestelmään, jos tiedetään vähintään kolmen erillisen kuvassa olevan pisteen koordinaatit. Pisteiden on oltava riittävän etäällä toisistaan, koska koordinaattien on selvästi poikettava toisistaan. 3D-malli saadaan vietyä sitä tarkemmin oikealle koordinaattipaikalleen, mitä tarkemmin tiedetään pisteiden sijainti. Perästä kuvattaessa tunnelin seinään piirretään neljä merkkiä, joiden sijainti käydään mittaamassa. Luotu 3D-kuva saadaan mitattujen pisteiden avulla vietyä kaivoksen koordinaattijärjestelmään. (ADAM Technology, 2010).

Turvallisuussyistä tukemattoman perän katon alle ei saa mennä. Tämä vaikeuttaa geologisen kartoituksen tekemistä, koska esimerkiksi rakojen kaateiden ja kaateiden suuntien mittaukset on tehtävä usean metrin päässä itse raosta. 3D-valokuvaustekniikka mahdollistaa rakojen rakenteiden mittaamisen kuvista, jolloin saadaan myös paljon tarkempaa tietoa rakojen sijainnista, kun perinteisillä peränkartoitusmenetelmillä. 3D-valokuvien ottaminen on myös suhteellisen nopeaa, yhden katkon valokuvaamiseen menee aikaa noin 10 minuuttia. Näin ollen valokuvaaminen ei myöskään aiheuta viivästyksiä peränajoon, vaan kuvat voidaan käydä ottamassa pölyn laskeuduttua perän tyhjäksi lastaamisen jälkeen, ennen verkotusta ja ruiskubetonointia.

Valaistuksen olisi oltava mahdollisimman tasainen koko kuvattavalla alueella, ettei kuviin tulisi ali- tai ylivalottuneita alueita. Pyhäsalmella kaivosgeologin autoon on asennettu erilliset valot tätä tarkoitusta varten. Tarvittaessa käytetään myös kannettavia valolähteitä. Pahasti alivalottuneet varjokohdat saattavat vääristää 3D-malleja ja estää pahimmillaan koko 3D-mallin luomisen.

Perään piirretään mielellään vähintään neljä mittapistettä mahdollisimman lähelle ammuttua katkoa. Kaivosmittaaja käy mittaamassa pisteet, ja pisteiden koordinaattien avulla kuvat saadaan vietyä Surpac:in tai muuhun käsittelyohjelmaan. Mikäli pisteitä ei ole piirretty tai niitä ei ole käyty mittaamassa, voidaan 3D-malli yrittää viedä oikeaan koordinaattipaikkaan esimerkiksi tunnelin katto- tai reunalinjan koordinaattien avulla. Tällöin on tiedettävä, mistä kohtaa tunnelia kuvat on otettu.

4.2. Aineiston keruu

Pyhäsalmen kaivoksella on otettu 3D-valokuvia vuodesta 2012 lähtien. Kuvia ovat ottaneet kaivosgeologi sekä näytteenkäsittelijät. Kuvia on pyritty ottamaan mahdollisimman monesta katkosta, mutta jokaisen katkon kuvaaminen ei luonnollisestikkaan ole ollut mahdollista. Joissakin tapauksissa mittapisteiden piirtäminen ennen kuvien ottamista on unohtunut, tai piirrettyjä pisteitä ei ole käyty mittaamassa. Edellä mainituista syistä johtuen 3D-mallit luotiin yhteensä 185 katkosta.

Kuvia on tasoilta 1375-1125 sekä tasoilta 1095 ja 1075. Suurin osa kuvista on tasojen 1300-1175 väliltä. Malmion pohjaosista kuvia on hyvin vähän. Malmion louhinta aloitettiin pohjalta vuonna 2001, ja kuvia alettiin ottaa vasta vuonna 2012. Kuvien määrä on vähäinen myös malmion pohjoisosista, koska pohjoisosien perät oli pääsääntöisesti jo ajettu siinä vaiheessa, kun kuvia alettiin ottamaan. Joissakin tapauksissa tulkinnan apuna käytettiin 2D-valokuvia. Sivukiven puolella otetut kuvat keskittyvät lähinnä malmion välittömään läheisyyteen ja kontaktikohtaan, muutamassa paikassa kuvia on myös apuperistä. Yhteenveto taulukkomuodossa käsiteltyjen katkojen määrästä per taso, sekä kartoitettujen rakojen määrä on esitetty osiossa 5 (Tulokset).

Siirtymien seuraamista 3D-valokuvauksen avulla kokeiltiin yhteensä 11:ssä malmin ja sivukiven kontaktikohdassa. Kuvaus aloitettiin 11.3.2015 ja sitä jatkettiin 18.6.2015 asti.

Siirtymistä pyrittiin ottamaan kuvat kerran viikossa, mutta tuotannollisista syistä johtuen jokaisen siirtymäkohdan kuvaaminen ei ollut mahdollista joka viikko. Kuvat otettiin samaan tapaan kuin peräkuvat eli mittapistet pyrittiin sijoittamaan oletettavasti liikkumattomalle alueelle. Mittapisteiden sijainti mitattiin kerran, seurannan alkuvaiheessa.

Siirtymien kuvauksessa yritettiin seurata 9-profiilin kontaktikohdan liikettä seuraavilla tasoilla: 1275, 1250, 1225 ja 1200. 5-profiilin kontaktia kuvattiin tasoilla 1300 ja 1275. Lisäksi 1275-tasolla kuvattiin 4-profiilin ja tutkimusperän kontaktikohtia. 1300-tasolla kuvattiin lisäksi profiilien 3, 4 ja 11 -kontaktikohtia. Kaikki kontaktikohdat sijaitsevat malmion pohjoispuolella, missä liike on ollut kaikkein näkyvintä.

4.3. Aineiston käsittely

Tässä työssä 2D-valokuvista prosessoitiin 3D-valokuvamalleja käyttäen ADAM Technology:n 3DM CalibCam -ohjelmistoa. 3D-valokuvamallit muunnettiin tiff-muotoon, jolloin ne pystytään avaamaan Surpac:ssa. Kuvista analysoitiin ja mitattiin rakenteita ja rakenteiden suuntia käyttäen WSP Finlandin Structural Suite -lisäosaa Surpac-ohjelmistoon. Surpac:sta käytettiin versiota 6.3. Kaivoksella otetuista kuvista prosessoitiin 3D-kuvat keväällä 2015 WSP Finland:n toimistolla Lauttasaareissa, ja kuvia analysoitiin elokuuhun 2015 asti.

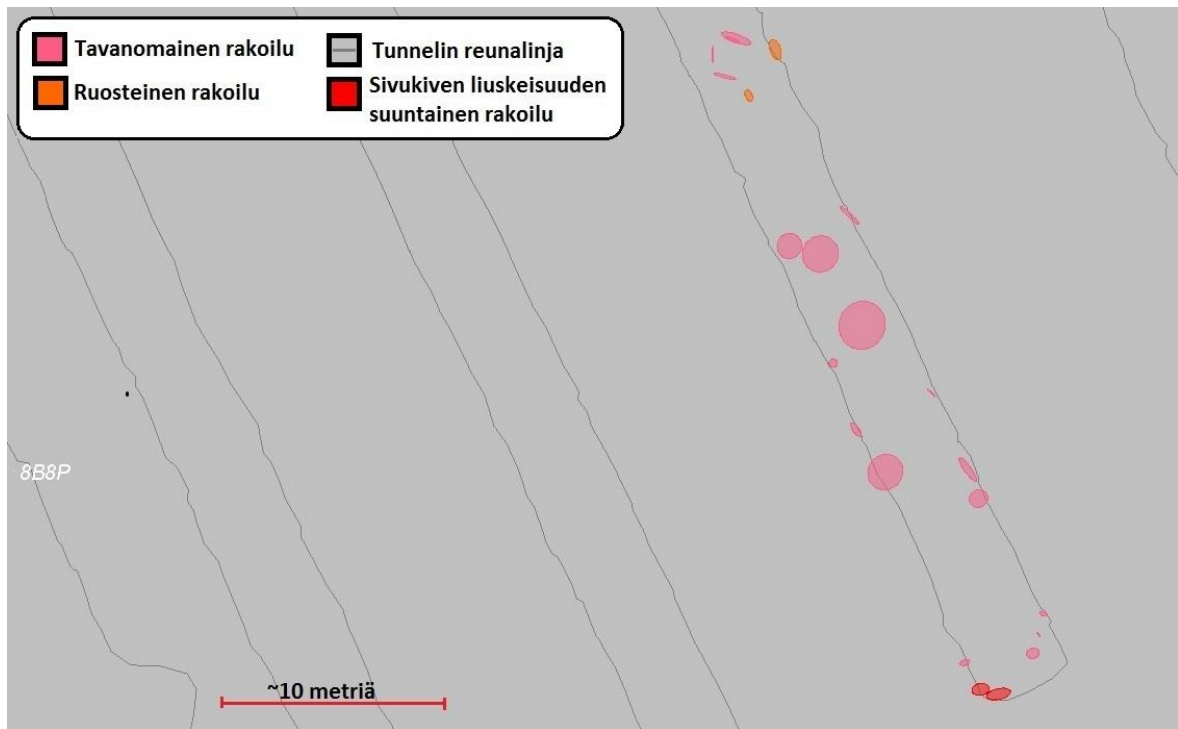
Kuvissa oli havaittavissa runsaasti erilaisia geologisia rakenteita: rakoja, siirroksia, liuskeisuuksia, mahdollisia poimurakenteita, kerroksellisuuksia/raitaisuuksia sekä erityyppisiä juonia, joista yleisimpinä pegmatiitti- ja kvartsijuonet. Silmiinpistävimpiä olivat suuren mittakaavan rakenteet. Parin sentin levyisiä kvartsijuonia pystyi kuitenkin myös havainnoimaan. Structural Suite:n avulla rakenteiden suuntia on mahdollista mitata (kaateen suunta/kaade), ja rakenteista pystyy luomaan tasoja. Mitatuista rakenteista pystyy luomaan alapalloprojektioita, ja mittaustuloksia voi viedä eri ohjelmistoihin.

4.3.1. Rakojen kartoitus

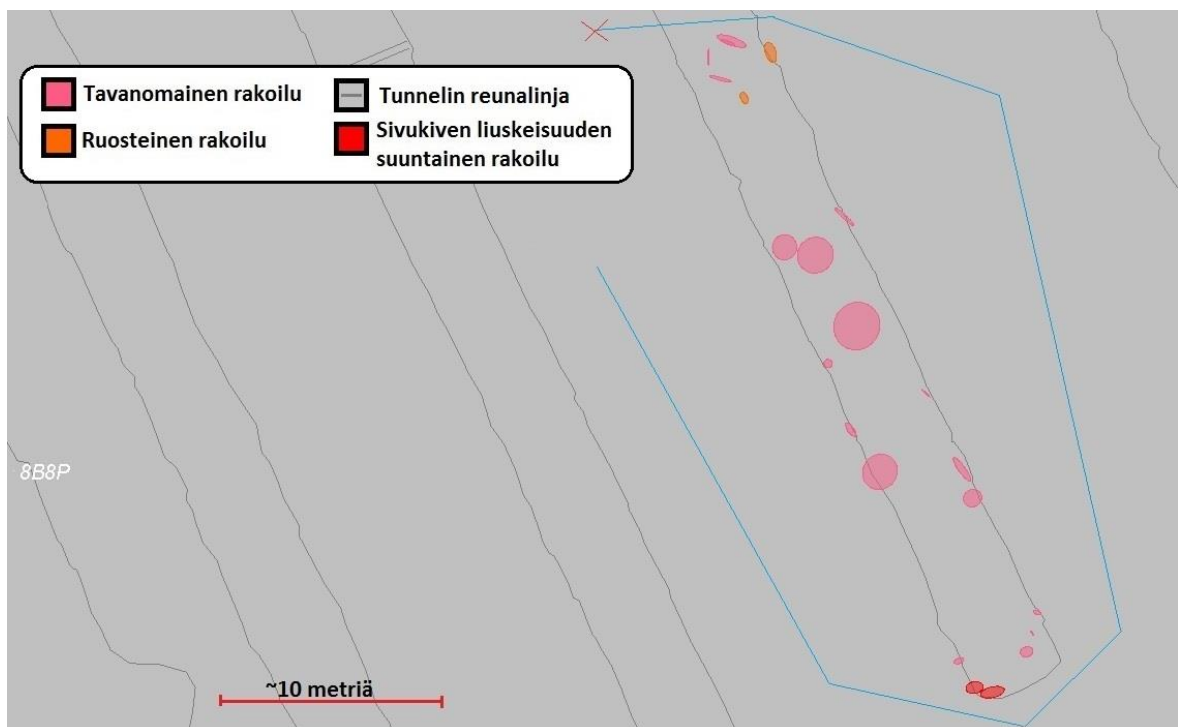
Structural Suite -lisäosan avulla kuvista kartoitettiin raot. Rakoilusta erotettiin Surpac:ssa erikseen malmion ja sivukiven puolella esiintyvä rakoilu, rakopinnaltaan muuttunut (ruosteinen) rakoilu, sekä sivukiven puolella liuskeisuuden suuntainen rakoilu ja muu rakoilu erikseen. Kartoituksessa pyrittiin huomioimaan ainoastaan selvästi jatkuvat, useiden metrien pituiset raot. Kartoitus suoritettiin perä kerrallaan, ja rakohavainnot tallennettiin tiedostoiksi, jotka nimettiin kulloisenkin tason ja perän nimen mukaan.

Raon kaateen ja kaateen suunnan kartoittamista varten raosta on oltava näkyvissä rakopinta, aivan kuten normaalistikin kompassilla rakoja kartoitettaessa. Jokaista näkyvää rakoa ei pyritty kartoittamaan, vaan kartoituksessa keskityttiin päärakosuuntien kartoittamiseen. Rakokartoituksia analysoitiin tarkemmin Structural Suite:lla, jolla pystytään valitsemaan aineistosta halutut raot, ja luomaan valituista rakoseteistä tasoja/rakotasoja (mean plane). Esimerkki esitetty kuvissa 14-17. Käytännössä poikkeavasti rakoilleita vyöhykkeitä etsittiin kuvien perusteella, ja rakotasoja luotaessa aineistoksi valittiin vain poikkeavasti rakoilleen vyöhykkeen kohdalla sijaitsevat rakohavainnot. Tällöin tehty rakotaso sijoittuu Surpac:ssa tarkasti poikkeavan rakoiluvyöhykkeen kohdalle. Esimerkin kuvissa tehty rakotaso kuvaa ainoastaan valitun aineiston päärakosuuntaa.

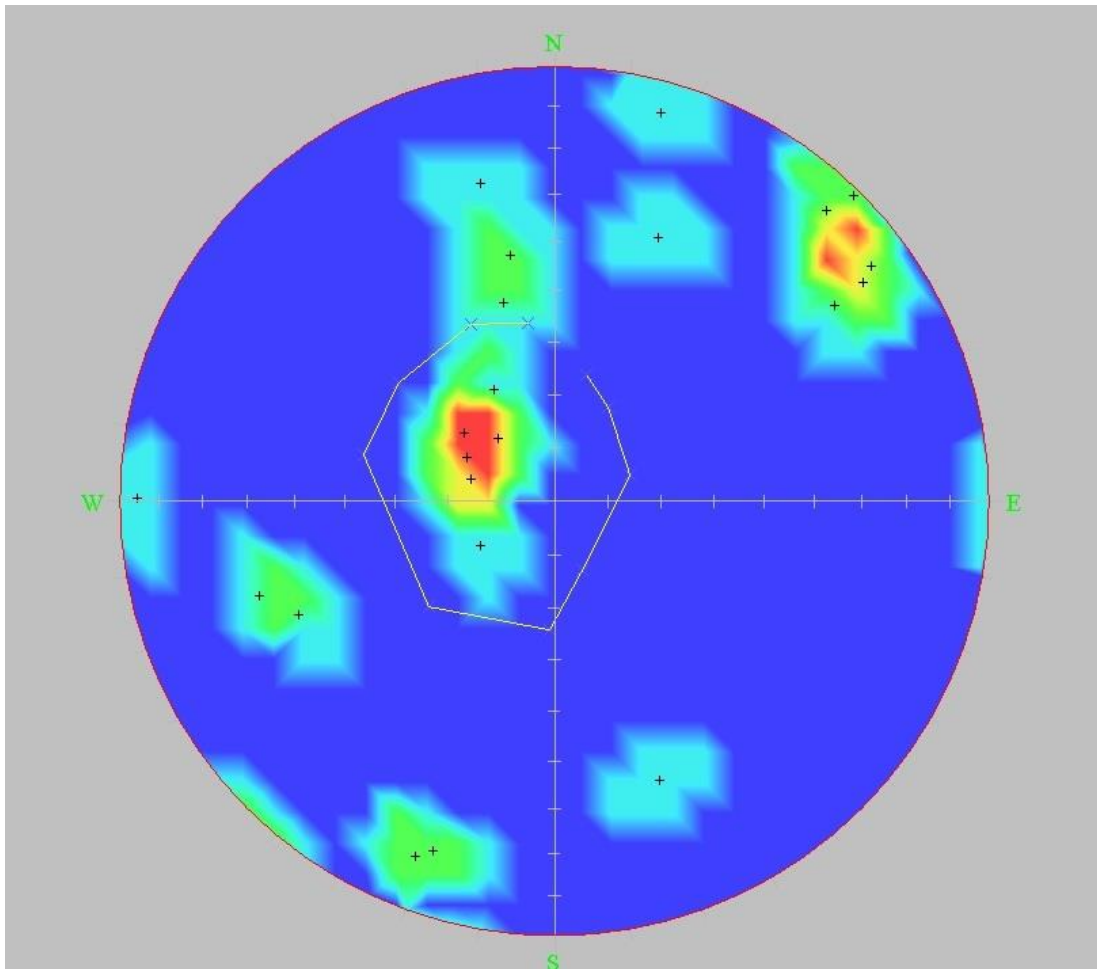
Joissakin tapauksissa peräkuvat oli otettu liian kaukaa, tai kuvia oli liian vähän, jolloin valmiista 3D-valokuvista tuli huonolaatuisia. Varsinkin perän sivuseinistä ei yleensä saa näissä tapauksissa mitään selvää. Tällaisista kuvista ei yleensä ottaen pystynyt kunnolla kartoittamaan rakoja tai tehdyt mittaukset ovat jossain määrin epäluotettavia.



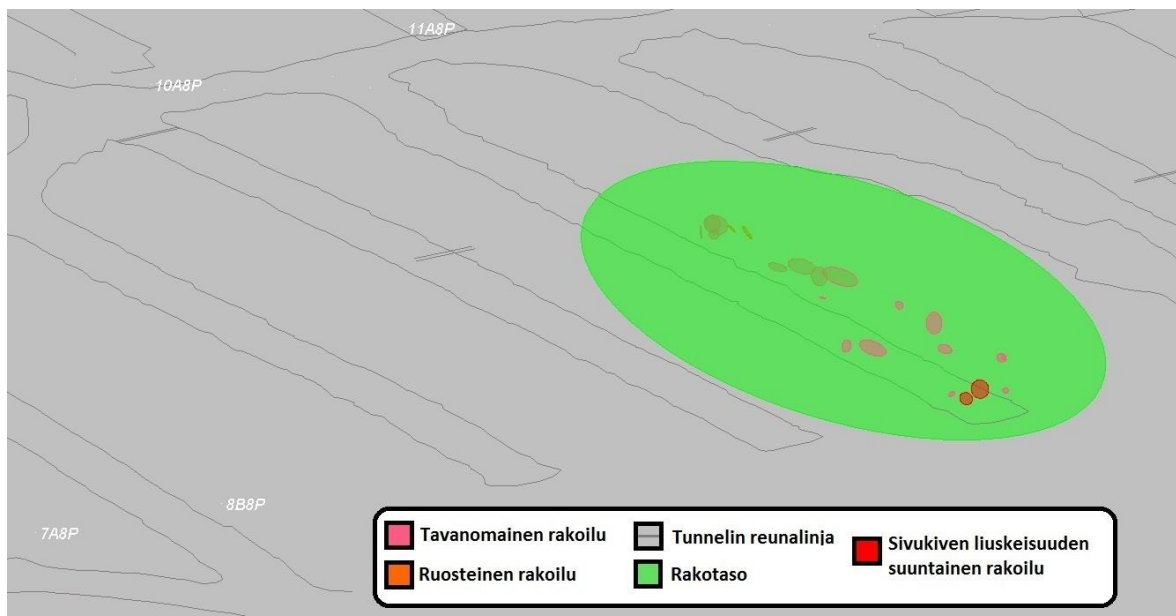
Kuva 14. Keskellä kuvaa louhosperä 11A8P tasolla 1225, ylhäältä päin tarkasteltuna, pohjoinen kuvassa ylös päin. Kartoitetut raot näkyvät oransseina, punaisina ja vaaleanpunaishina ympyröinä.



Kuva 15. Alapalloprojektion luomista varten raoista valitaan tarkasteluun halutut raot ympyröimällä, tässä tapauksessa kaikki kartoitetut rakohavainnot.



Kuva 16. Alapalloprojektiosta voidaan valita haluttu rakosetti, ja tehdä siitä taso/rakotaso (mean plane).



Kuva 17. Kuvassa 16 tehty taso surpac:ssa esitettyinä. Tässä tapauksessa tehty taso kuvaa ainoastaan valitun aineiston päärakosuuntaa.

4.3.2. Rakennegeologisten havaintojen kartoitus

Kuvissa on havaittavissa myös runsaasti muita geologisia rakenteita, joista pyrittiin tekemään mittauksia Structural Suite:n avulla. Lisäksi kokeiltiin erilaisia tapoja mallintaa rakenteita Surpac:ssa.

Rakenteita kokeiltiin kartoittaa Surpac:ssa myös digitoimalla niitä suoraan kuvan päälle ja luomalla niistä tasoja, joiden suuntia pystyy Structural Suite:n avulla mittaamaan. Malmiossa havaittavissa olevia rakenteita pyrittiin myös mallintamaan. Sivukiven puolella olevien pegmatiittijuonten suuntia yritettiin mallintaa useammassa paikassa. Tarkemmin rakenteiden mallintamista on esitelty kohdassa 5 (Tulokset).

4.3.3. Siirtymien analysointi

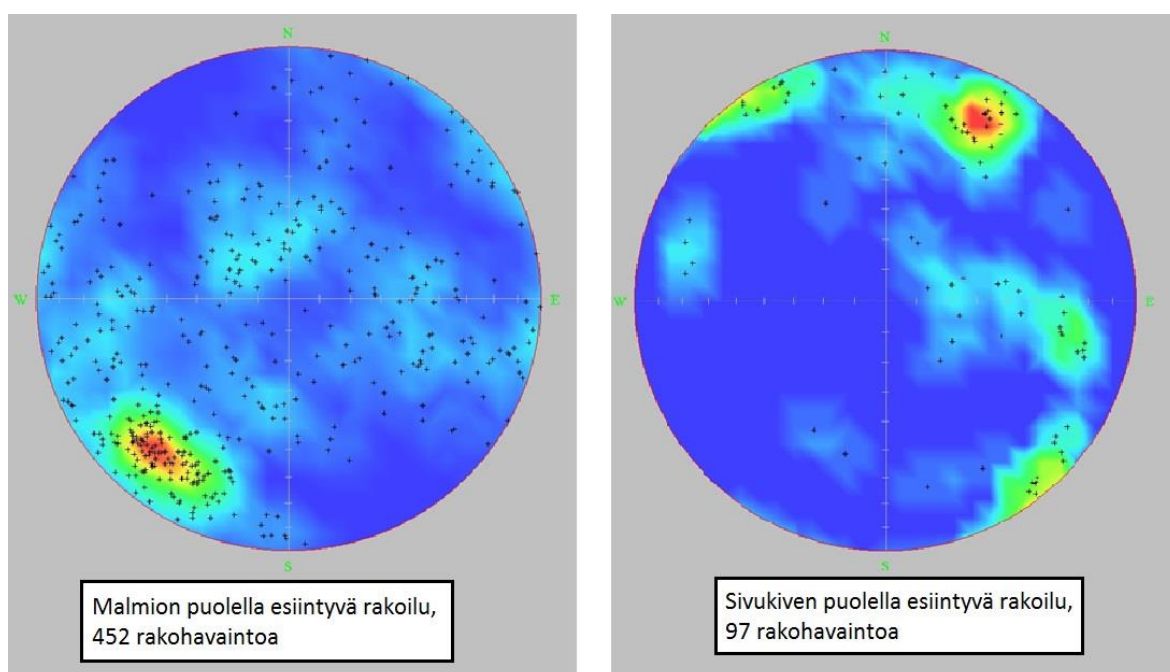
Siirtymistä otettuja kuvia analysoitiin käyttäen Structural Suite:a, ja kuvia vertailtiin Surpac:ssa päällekkäin leikkaustyökalun avulla. Structural Suite:n avulla siirtymissä havaituista siirrospinnoista tehtiin myös tasoja. Vajouman suuruutta pyrittiin mittaamaan Surpac:n mittaustyökalujen avulla, vertailemalla kuvia ja alkuperäistä tunnelin katon linjaa toisiinsa.

5. TULOKSET

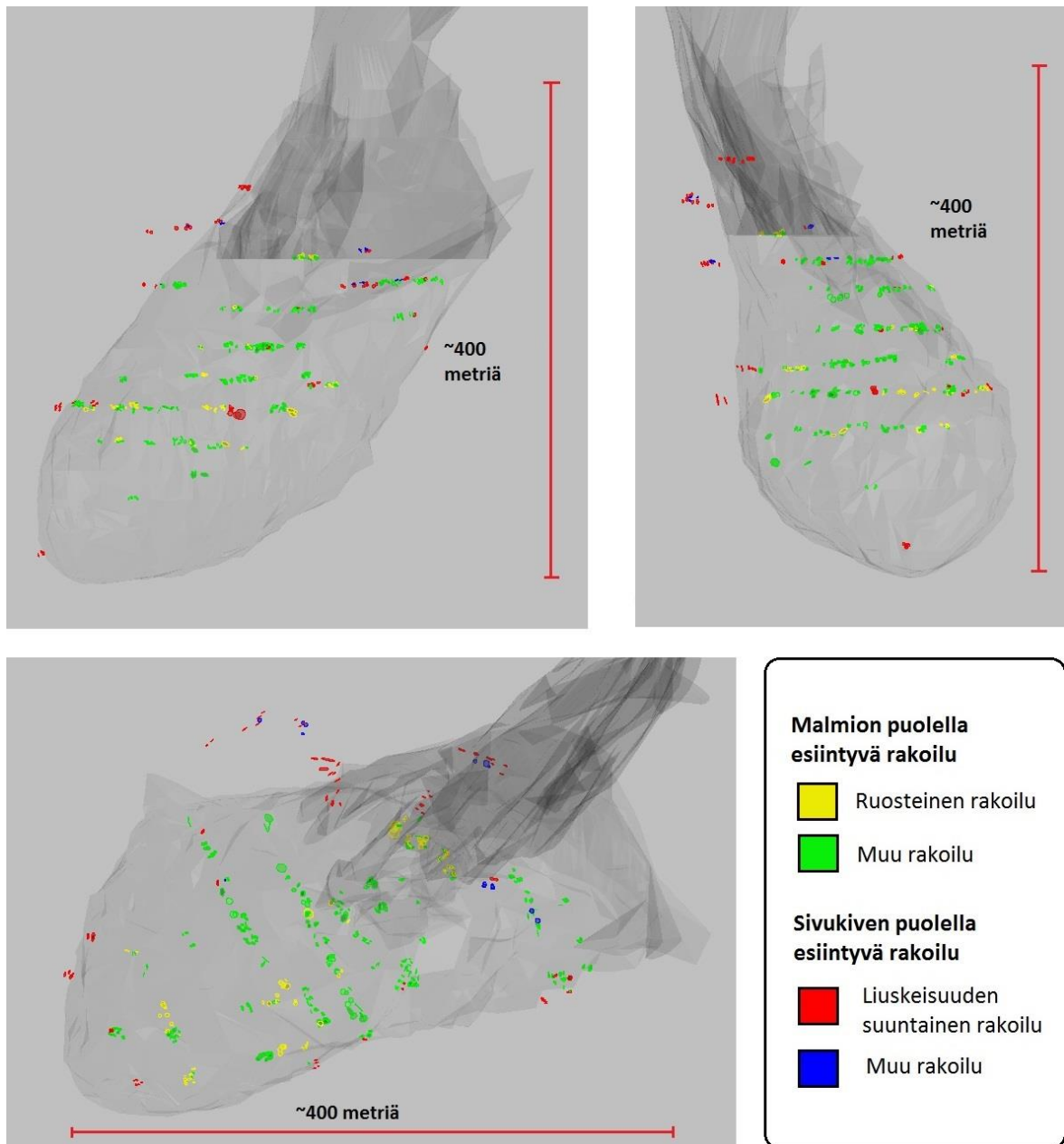
Tuloksiin tutustuttaessa on syytä ottaa huomioon kolmiulotteisen aineiston esittämisen haastavuus kaksiulotteisena. Varsinkin 3D-kuvien hahmottaminen 2D:nä voi olla vaikeaa. Rakokartoituksen tuloksia on esitelty kolmella eri tavalla: kuvina, taulukkona sekä alapalloprojektioina. Rakennegeologisen kartoituksen tulokset ovat lähinnä kuvia ja alapalloprojektioita, siirtymien seurannan tulokset kuvia.

5.1. Rakokartoitus

Rakokartoituksen yhteydessä kuvista kartoitettiin eri tyyppiset raot erikseen seuraavasti: sivukiven puolella esiintyvä liuskeisuuden suuntainen rakoilu ja muu rakoilu erikseen sekä malmion puolella rakopinnaltaan oletettavasti muuttumaton rakoilu ja rakopinnaltaan ruosteinen rakoilu erikseen. Kuvassa 18 rakoilua on esitelty alapalloprojektioina. Kaikki tehdyt rakohavainnot Surpac:ssa on esitetty kuvassa 19. Taulukossa 3 on puolestaan eritelty kartoitettujen katkojen lukumäärä per taso sekä kartoitettujen rakojen määrä.



Kuva 18. Vasemmalla alapalloprojektio, jossa malmion puolella esiintyvä rakoilu, ja oikealla sivukiven puolella esiintyvä rakoilu.



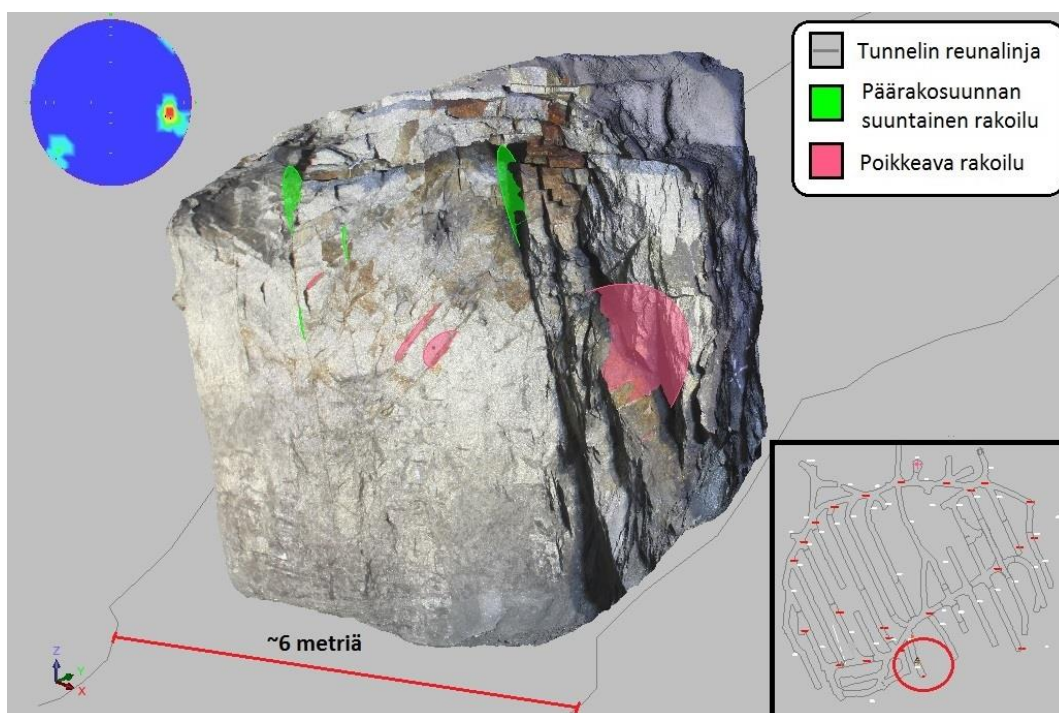
Kuva 19. Kaikki Pyhäsalmen syvämalmiosta tehdyt rakohavainnot Surpac:ssa esitettynä. Vasemmalla ylhäällä oleva kuva etelästä päin nähtynä, oikealla ylhäällä oleva kuva lännestä päin, ja alimmainen kuva suoraan malmion päältä päin nähtynä. Alimmassa kuvassa pohjoinen ylöspäin.

Taulukko 3. Yhteenveto kartoitettujen katkojen määrästä per taso, sekä kartoitettujen rakojen määrä. Erikseen erotettu malmion ja sivukiven puolella tehdyt rakohavainnot.

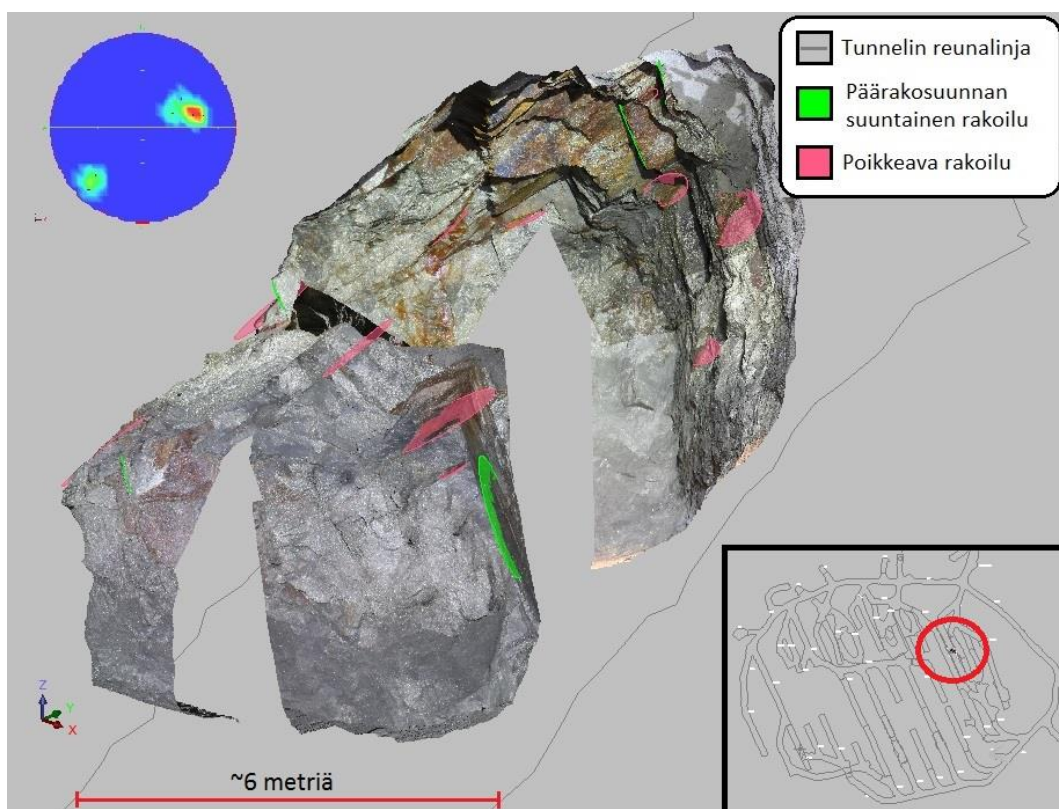
Taso	Kartoitettujen katkojen lkm	Katkoja sivukivi	Katkoja malmio	Kartoitettujen rakojen lkm	Rakojen sivukivi	Rakojen malmio
1075	1	0	1	0	0	0
1095	4	4	0	8	8	0
1125	7	7	0	14	14	0
1150	6	2	4	28	6	22
1175	30	11	19	76	29	47
1200	34	17	17	58	4	54
1225	21	3	18	75	4	71
1250	23	2	21	99	8	91
1275	35	5	30	118	19	99
1300	18	0	18	58	0	58
1325	2	0	2	3	0	3
1350	2	0	2	7	0	7
1375	2	2	0	5	5	0
Yht. kpl	185	53	132	549	97	452

Malmion puolella on selvästi havaittavissa yksi päärakosuunta, 040/72, joka on sama kuin aiemmissakin tutkimuksissa (Struthers 2005). Sivukiven puolella havaintojen määrä on hyvin vähäinen, ja lähes kaikki havainnot ovat liuskeisuuden suuntaisesta rakoilusta. Sivukiven puolella muut kuin liuskeisuuden suuntaiset raot vaikuttavat olevan täytteisiä, osin mahdollisesti jopa vanhoja siirrospintoja.

Kuvien perusteella päärakosuunnasta poikkeava rakoilu vaikuttaisi esiintyvän erillisinä, heikosti tai voimakkaammin rakoilleina vyöhykkeinä, joita on havaittavissa lähes kaikissa tarkastelluissa louhosperissä. Poikkeavasti rakoilleille vyöhykkeille on usein tyypillistä, että rakopinnat tai koko kallio on rakoiluvyöhykkeen kohdalla voimakkaasti hapettunutta, 'ruostunutta' (Kuvat 20 ja 21). Joissakin tapauksissa perä on saatettu ajaa miltei poikkeavan rakoilun kulun suuntaisesti, minkä perusteella ainakin jotkin poikkeavat rakoiluvyöhykkeet ovat hyvin pitkiä, useita kymmeniä metrejä. Esimerkkinä tasolla 1250 sijaitseva louhosperä 15A7P (Kuva 21). Yhteensä tällaisia poikkeavia rakoiluvyöhykkeitä löytyi kuvista 33.



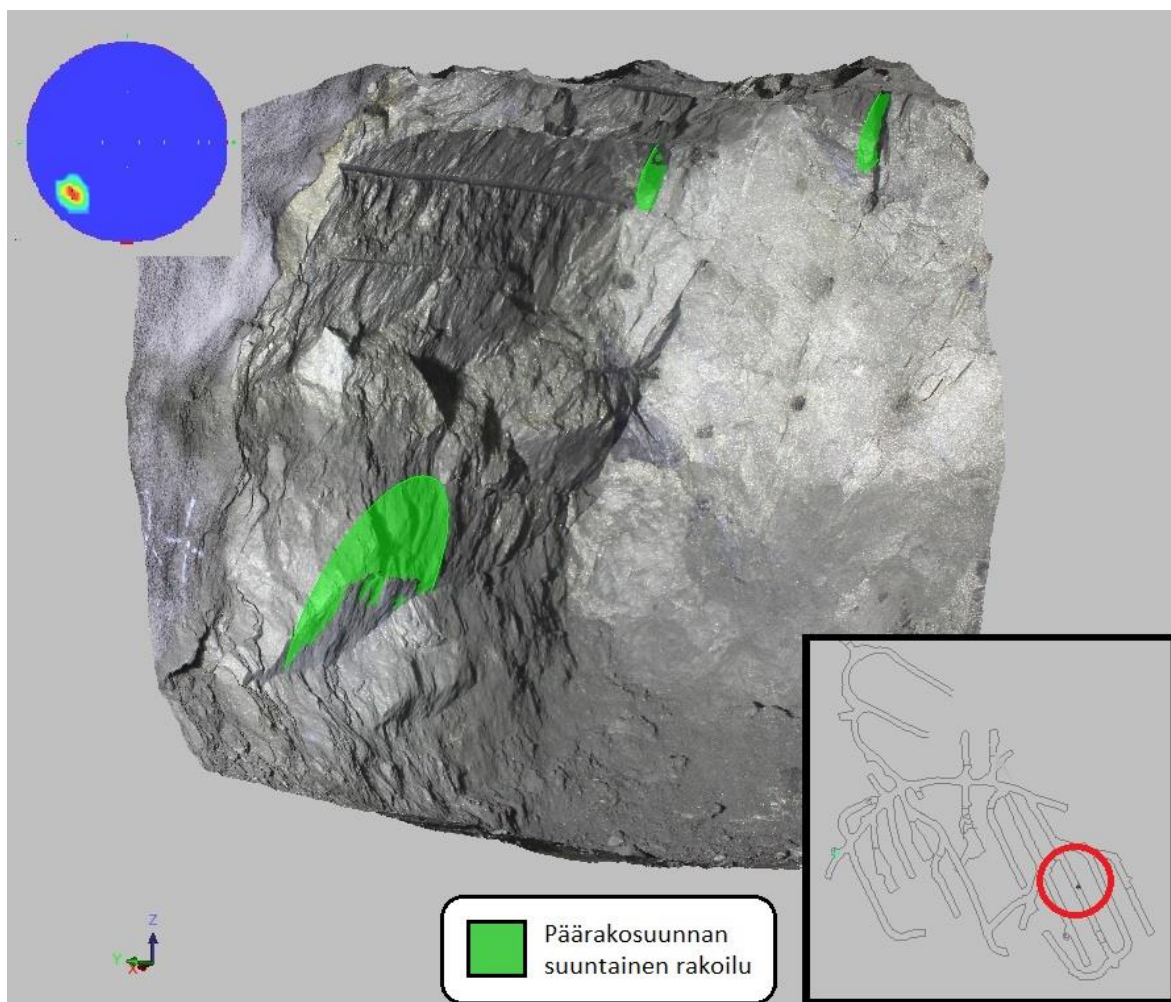
Kuva 20. Taso 1275, louhosperä 9B6P, katko 9 viistosti ylhäältä tunnelin ulkopuolelta katsottuna. Sijainti merkitty oikealla alhaalla olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä. Vihreällä päärajoilu, vaaleanpunaisella poikkeava, heikosti 'ruosteinen' rakoilu. Alapalloprojektiio rakoilusta kuvan vasemmassa yläreunassa.



Kuva 21. Tasolla 1250 sijaitseva louhosperä 15A7P, katkot 19 ja 17, viistosti ylhäältä tunnelin ulkopuolelta tarkasteltuna. Sijainti merkitty oikealla alhaalla olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä. Vihreällä päärajoilu, joka vaikuttaa normaalia voimakkaammalta, ja vaaleanpunaisella poikkeava, rakopinnoiltaan voimakkaasti 'ruostunut' rakoilu. Poikkeavaa rakoilua oli 2D-kuvien perusteella havaittavissa katkosta 14 lähtien katkoon 20 asti, mutta 3d-kuvien teko ei ollut mahdollista joka katkosta. Alapalloprojektiio rakoilusta kuvan vasemmassa yläreunassa.

5.1.1. Päärakoilu

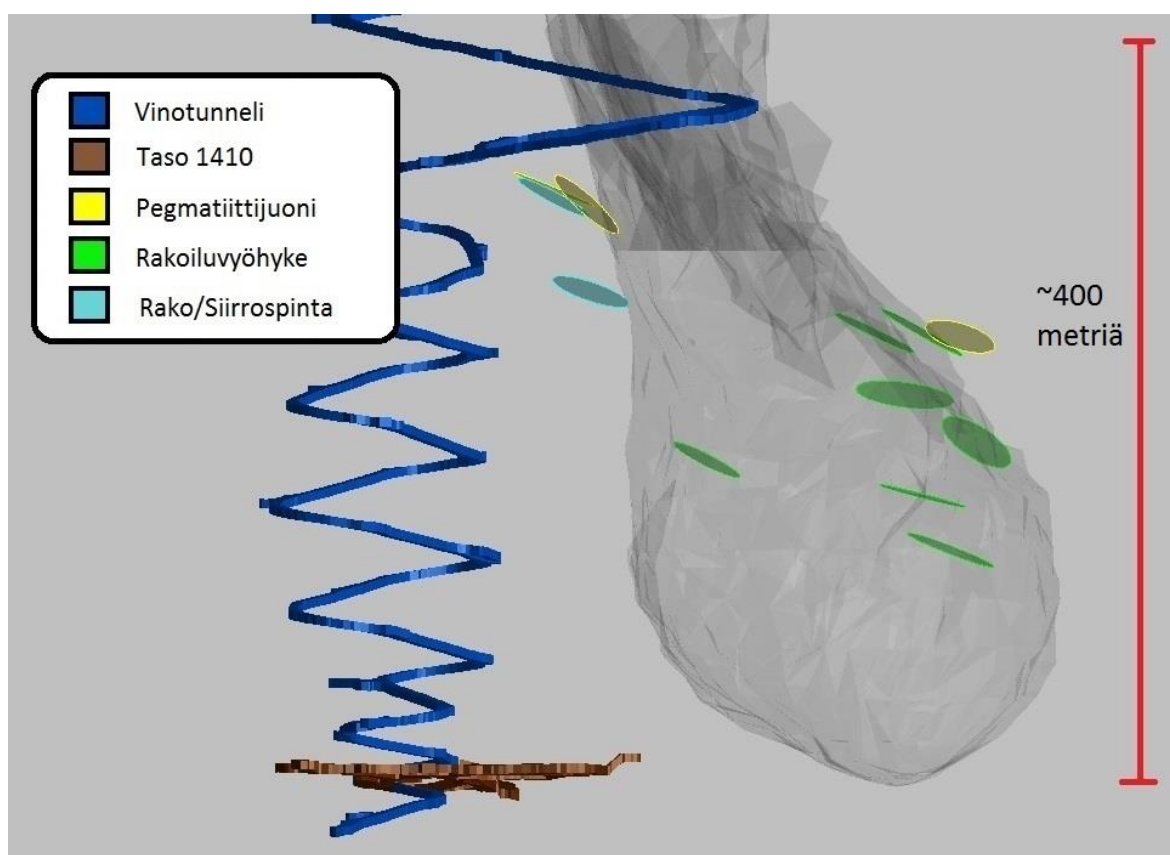
Malmion kaakko–luode-suuntainen päärajoilu on havaittavissa ympäri malmiota. Päärakojen suunta vaihtelee hieman, ja se vaikuttaa osin myötäilevän malmion muotoa. Päärakosuunnan mukaiset raot vaikuttavat yleensä lyhyiltä, ja paikoitellen rajoilu on vain hyvin heikosti havaittavissa. Kuitenkin joissakin tapauksissa raot ovatkin pitkiä, suoria ja rakopinnat tasaisia, esimerkiksi kuvassa 21. Päärakojesta on havaintoja lähes kaikista katkoista, joista ylipäätään on tehty rako havaintoja. Tyypillistä päärajoilua esitetty kuvassa 22.



Kuva 22. Tasolla 1175 sijaitseva louhosperä 17A10P, katko 2. Sijainti merkitty oikealla alhaalla olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä. Kuvassa katkon vasen reuna, leveys noin 3 metriä. Vain päärakosuunnan mukaista heikkoa rajoilua havaittavissa, raot vaikuttavat lyhyiltä, ja rakopinnat karheilta tai aaltoilevilta. Alapalloprojektiio rajoilusta kuvan vasemmassa yläreunassa.

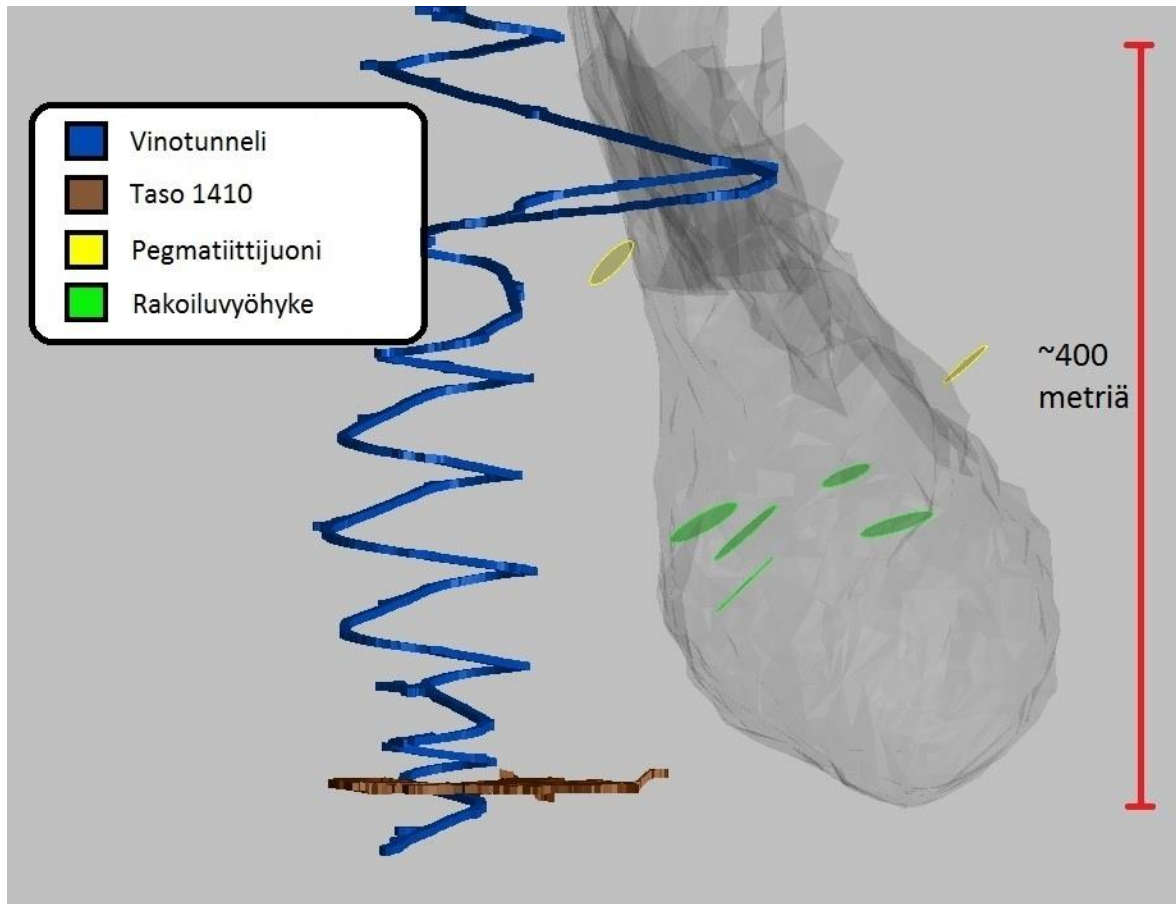
5.1.2. Loiva-asteiset rakoiluvyöhykkeet

Malmion puolella on havaittavissa ainakin kuusi loiva-asteista rakoiluvyöhykettä, joiden kaateen suunta on pääasiassa etelään päin, ja kaade välillä $18-30^{\circ}$. Alimmat havaitut vyöhykkeet sijaitsevat tasolla 1300, ja ylimmät tasolla 1200 (Kuva 23). Tasolla 1175 apuperässä 1 on havaittavissa siirrospinta/rako, jonka suunta on noin $250/17$, samoin miinaperässä tasolla 1125 on havaittavissa pegmatiittijuoni, jonka kaade on sama kuin etelään viettävien loivien rakosettien ja kaateen suunta lounaaseen päin. 1200-tasolta malmion eteläpuolelta löytyy pegmatiittijuoni, jonka suunta on noin $235/27$. Pegmatiittijuonia ja niiden suunnan määrittämistä esitelty tarkemmin kohdassa: 5.2.2. Pegmatiittijuonet. 1175-tasolla apuperässä 1 sijaitsevaa rako/siirrospintaa esitelty kohdassa: 5.3. Muita havaintoja.

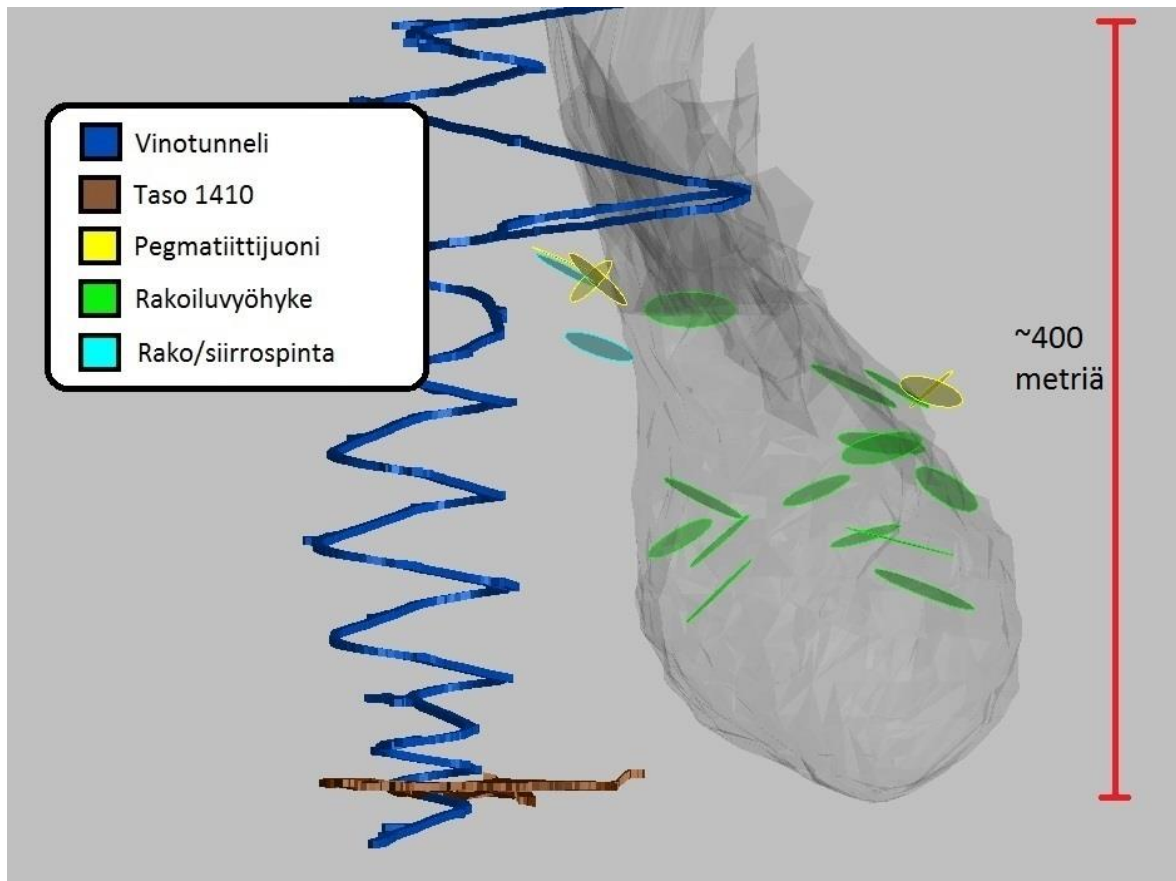


Kuva 23. Vihreällä loiva-asteisia rakoiluvyöhykkeitä, näkyvissä taso 1410. Katselusuunta lännestä itään, pohjoinen vasempaan päin. Keltaisella pegmatiittijuonten suuntia, sinisellä tasolla 1175 havaitun yksittäisen siirrospinnan suunta, sekä miinaperässä havaitun yksittäisen raon/siirrospinnan suunta. Rakovyöhykkeiden kaade vaihtelee välillä $18-30^{\circ}$, kaateen suunta noin 185° .

Malmiossa on havaittavissa myös viisi loiva-asteista rakoiluvyöhykettä, joiden kaade on noin 30 astetta tai jyrkempi, ja kaateen suunta pohjoiseen päin (Kuva 24). Tasolta 1200 löytyy malmion eteläpuolelta pegmatiittijuoni, jonka kaateen suunta ja kaade on noin 360/46. Lisäksi löytyy muutamia muita loivia rakosettejä, joiden suunta ei ole yhtä selvästi vain pohjoiseen tai etelään. Kaikki loiva-asteiset rakoiluvyöhykkeet esitettynä kuvassa 25.



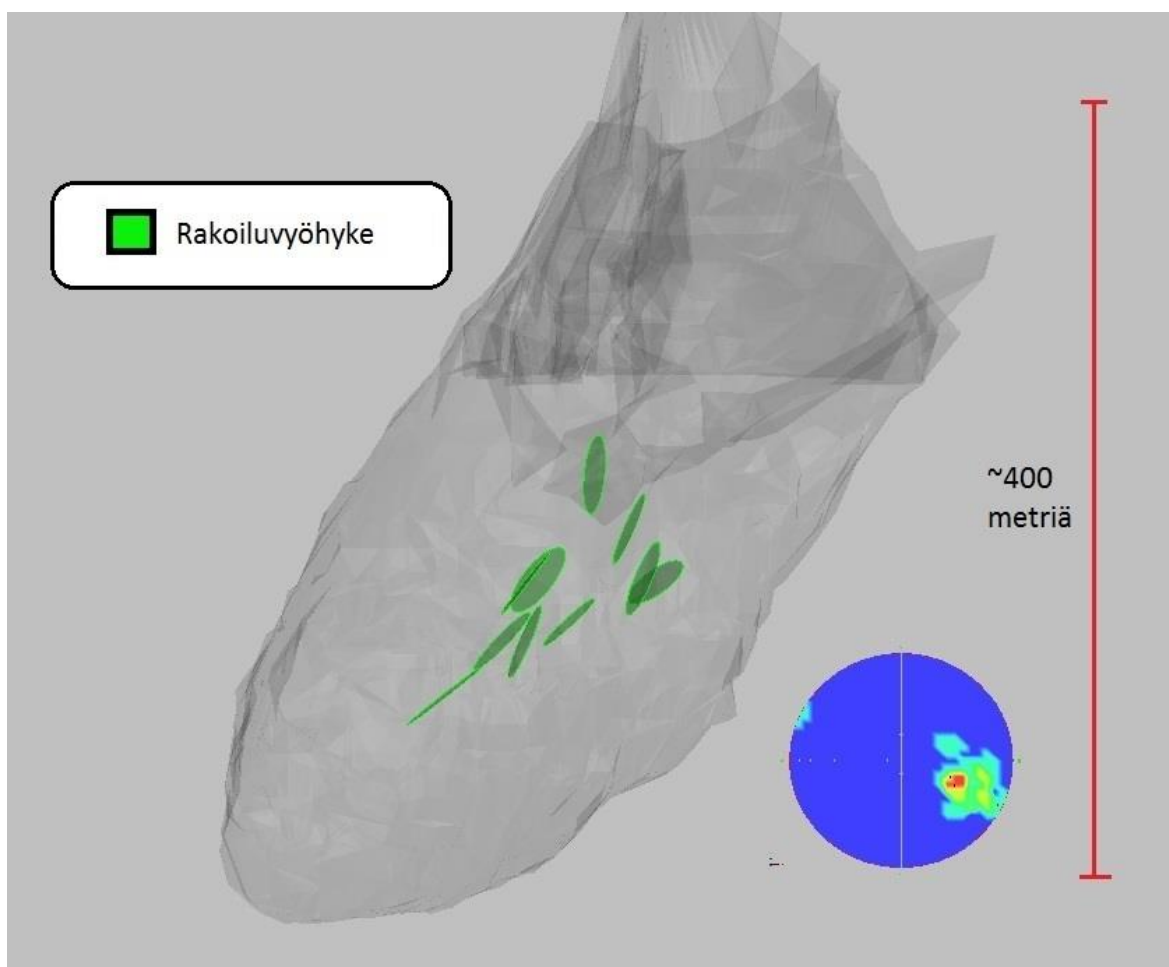
Kuva 24. Vihreällä viisi rakovyöhykettä, joiden kaateen suunta/kaade on keskimäärin 004/30, sekä keltaisella pegmatiittijuonet, joista toisen suunta on mahdollisesti 358/46, toisen 343/50. Katselusuunta lännestä itään päin, pohjoinen kuvassa vasemmalla. Näkyvissä taso 1410.



Kuva 25. Kaikki havaitut loivat rakoiluvyöhykkeet vihreällä, keltaisella pegmatiittijuonet, ja sinisellä yksittäiset vaakaraot/siirrosninnat. Näkyvillä taso 1410. Pohjoinen kuvassa vasempaan päin.

5.1.3. Malmion lounaasta koilliseen lävistävä rakoiluvyöhyke

Malmiossa on myös havaittavissa rakoiluvyöhykkeitä, jotka ovat lounas–koillis -suuntaisia, ja joiden kaade jyrkkenee siirryttäessä malmiossa ylöspäin. Tasolla 1300 on ensimmäinen tällainen havainto malmion lounaisosasta, ja siirryttäessä malmiossa ylöspäin havainnot siirtyvät itään päin (Kuva 26). Havaintoja kyseisestä rakosuunnasta on yhteensä kymmenestä eri kohdasta. Kallio on tyypillisesti hyvin voimakkaasti rakoillutta tämän vyöhykkeen alueella, sekä voimakkaasti ruosteista.

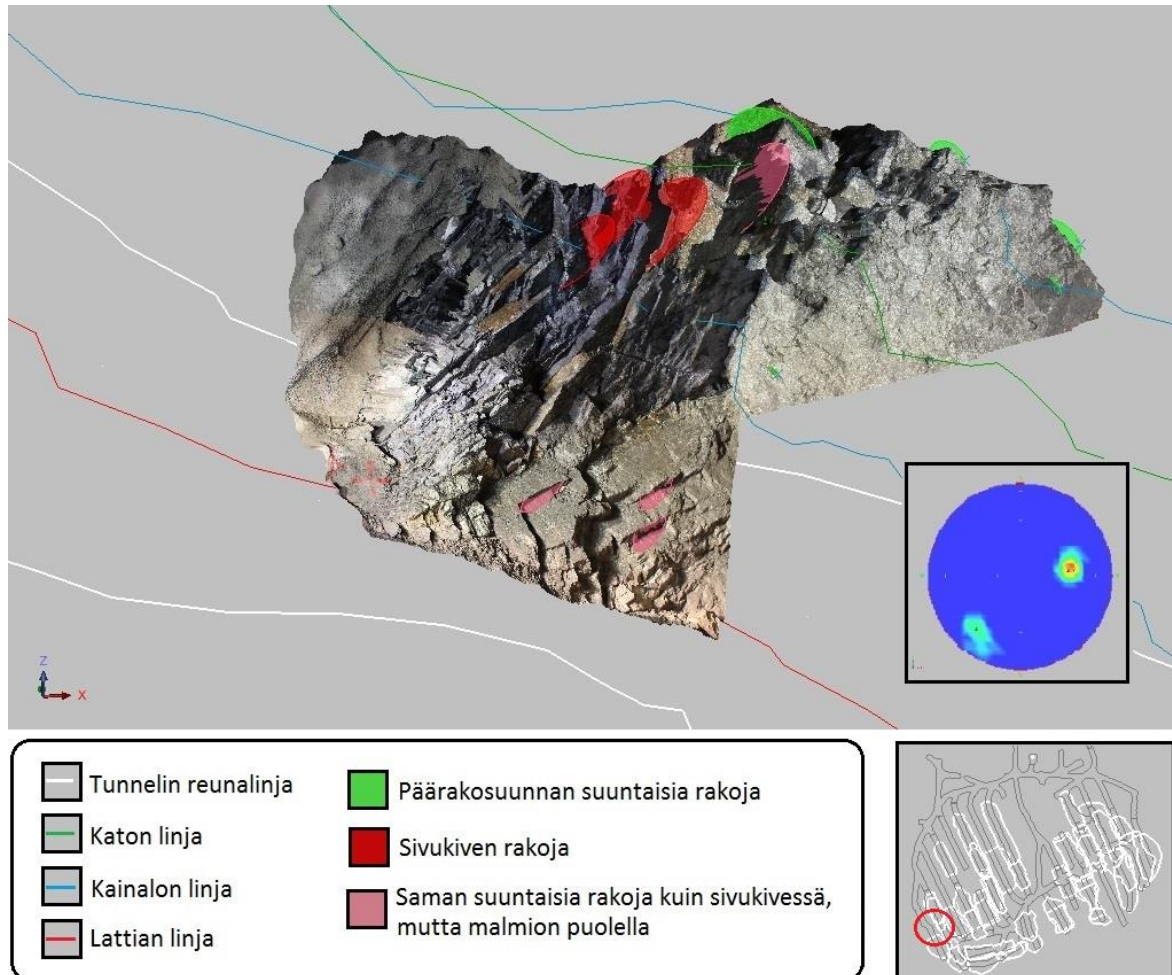


Kuva 26. Vihreällä lounas–koillis -suuntaiset rakoiluvyöhykkeet, joiden kaade jyrkkenee siirryttäessä malmiossa ylöspäin. Kaateen suunta noin 290, kaade noin 55 astetta. Katselusuunta lounaasta koilliseen. Oikealla alhaalla alapalloprojektio rakoiluvyöhykkeistä.

5.1.4. Muita rakoiluhavaintoja

Rakoiluvyöhykkeet ovat pituudeltaan mahdollisesti kymmeniä metrejä. Rakovyöhykkeiden ulottuvuuksia yritettiin arvioida tekemällä rakovyöhykkeistä useammalle louhostasovälille yltäviä tasoja. Tämän jälkeen vertailtiin, löytyykö tehdyn tason kohdalla vastaavan suuntaista rakoilua esimerkiksi yläpuolella olevalta louhostasolta, tai viereisistä louhoksista. Esimerkiksi tasolla 1275 louhosperässä 5A6P on havaittavissa loiva-asteista rakoilua katkoissa 9 ja 10, ja saman suuntainen rakoilu vaikuttaisi jatkuvan saman tason louhosperässä 3A6P, katkossa 18. Mikäli kyse todella on samasta rakoiluvyöhykkeestä, rakoilun on täytynyt muodostua ennen kuin välissä oleva 4-profiili on louhittu. Tasolla 1300 louhosperässä 10B5B havaittavissa oleva voimakkaasti rakoillut vyöhyke on havaittavissa myös ainakin tasolla 1275 louhosperässä 9B6P.

Malmion ja sivukiven kontaktikohta on paikoitellen normaalia tiheämmin rakoillutta. Näissä tapauksissa rakojen suunta malmion puolella saattaa myötäillä sivukiven liuskeisuuden suuntaa (Kuva 27). Rakojen pituudesta ei ole tietoa, malmion puolella voimakkaasti rakoilleet vyöhykkeet vaikuttavat hyvin paikallisilta.

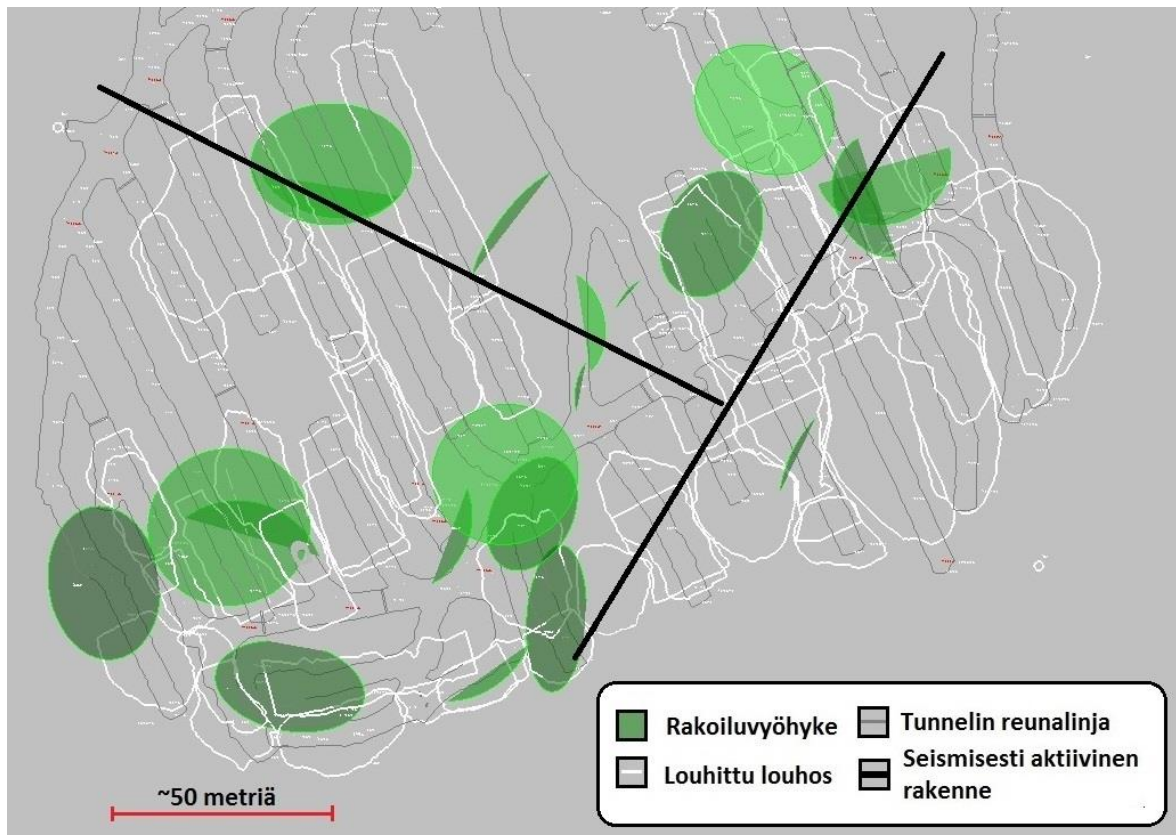


Kuva 27. Malmion ja sivukiven kontaktikohta tasolla 1275, louhosperässä 3A6P, tunnelin ulkopuolelta lounaasta päin tarkasteltuna. Sijainti merkitty oikeassa alakulmassa olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä. Alapalloprojektio rakoilusta tasokartan yläpuolella.

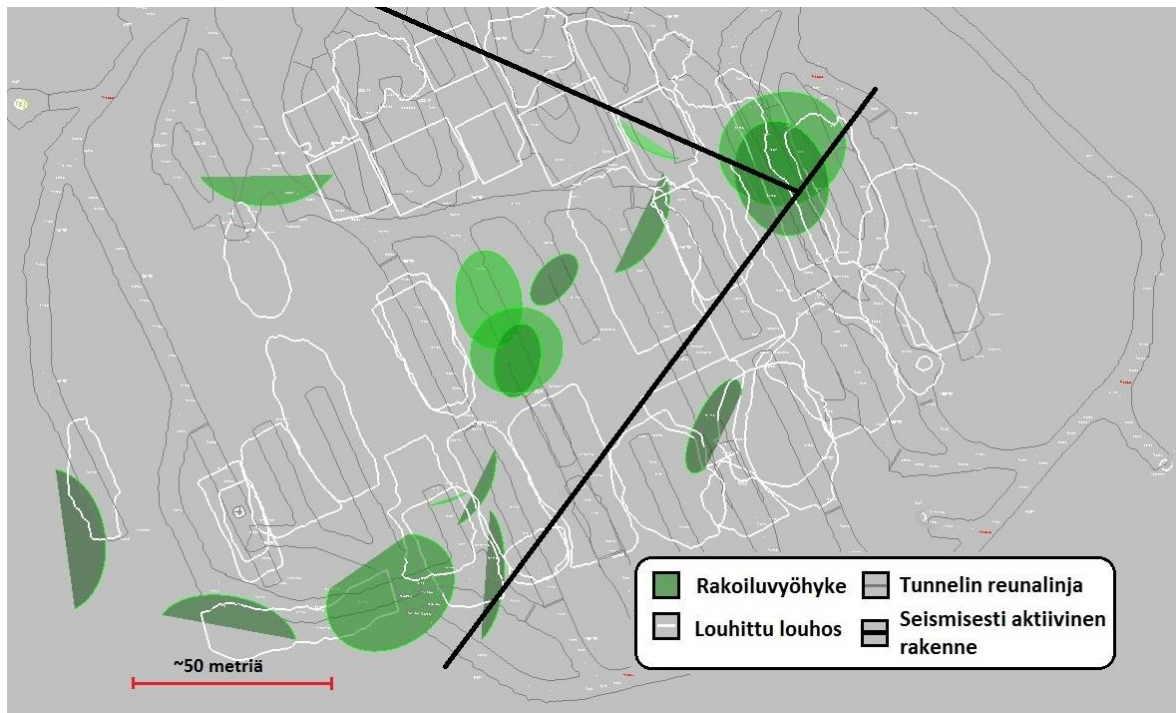
Poikkeavasti rakoilleita vyöhykkeitä löytyi kuvista yhteensä 33 kpl. Kun vyöhykkeiden suuntia verrataan Bergströmin (2011) tekemiin havaintoihin seismisesti aktiivisista rakenteista huomataan, että rakoiluvyöhykkeet ovat samansuuntaisia, ja sijaitsevat paikoitellen samoissa kohdissa, kuin mihin Bergström on mallintanut seismisesti aktiivisia rakenteita (Kuvat 28, 29 ja 30). Rakenteet vaikuttavat rakoiluhavaintojen perusteella hyvin laajoilta, ja varsinkin lounaasta koilliseen suuntautuva rakenne erottuu hyvin.



Kuva 28. 1300-taso, pohjoinen kuvassa ylhäällä. Paksut mustat viivat Bergströmin mallintamia seismisesti aktiivisia rakenteita, vihreät tasot rakokartoituksen yhteydessä havaittujen, poikkeavasti rakoilleiden vyöhykkeiden suuntia.



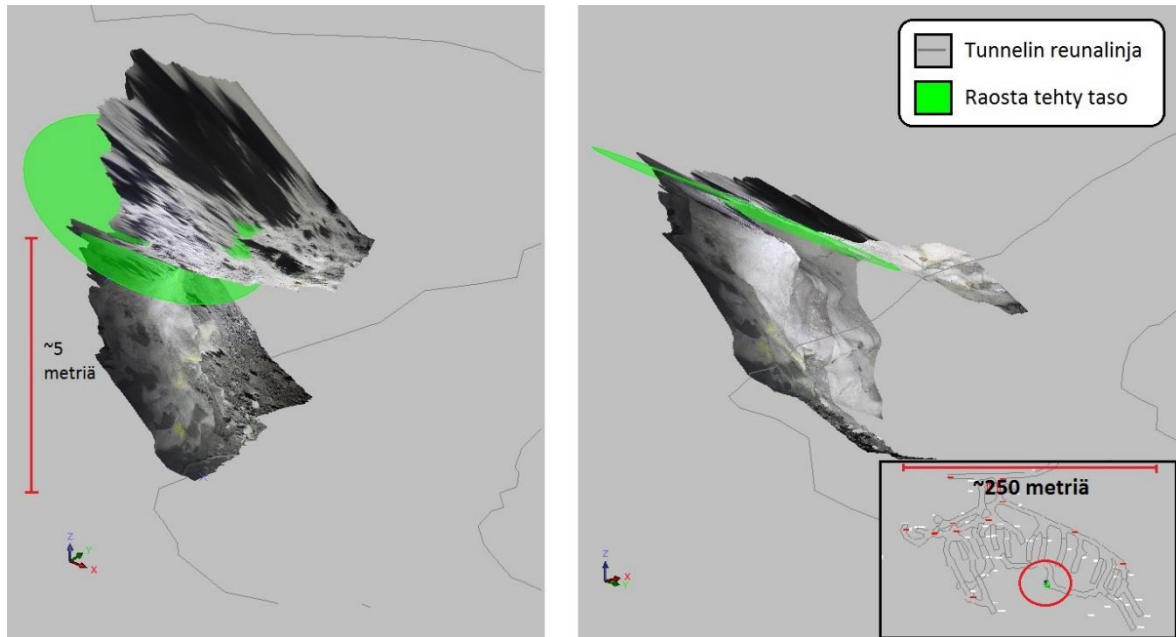
Kuva 29. 1275-taso, pohjoinen kuvassa ylhäällä. Paksut mustat viivat Bergströmin mallintamia seismisesti aktiivisia rakenteita, vihreät tasot rakokartoituksen yhteydessä havaittujen, poikkeavasti rakoilleiden vyöhykkeiden suuntia.



Kuva 30. 1250-taso, pohjoinen kuvassa ylhäällä. Paksut mustat viivat Bergströmin mallintamia seismisesti aktiivisia rakenteita, vihreät tasot rakokartoituksen yhteydessä havaittujen, poikkeavasti rakoilleiden vyöhykkeiden suuntia.

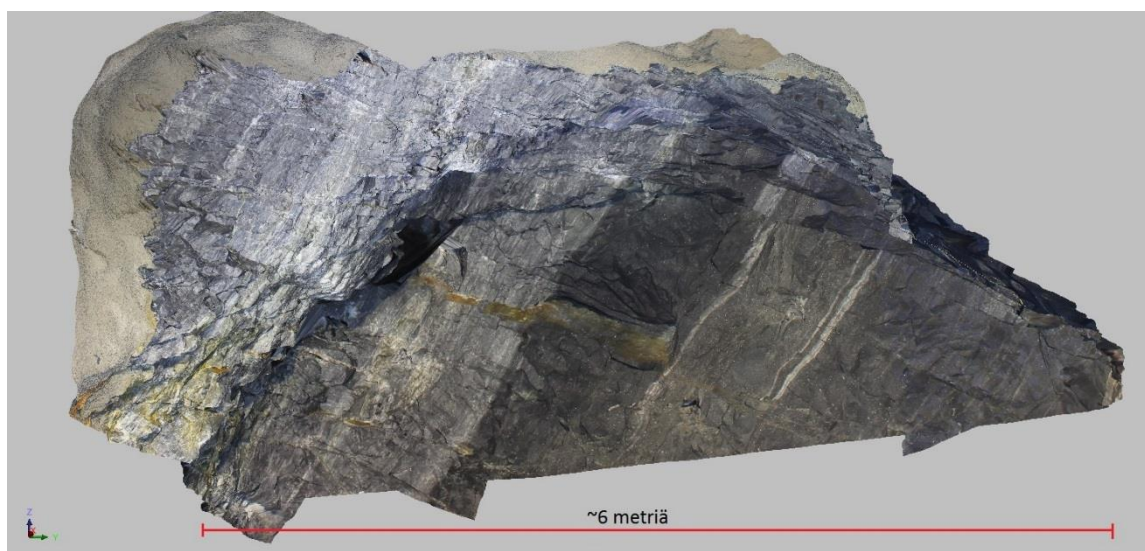
5.1.5 Tason 1150 avonainen rako

Tammikuussa 2015 tasolla 1150 tuli peränajon yhteydessä vastaan hyvin suuri avonainen rakenne. Rakenne sijaitsee apuperässä 4, malmion eteläpuolella. Kallio oli jo ennen avonaista rakoja hyvin voimakkaasti rakoillutta, ja itse raon/rakenteen kohdalla avauman suuruus oli suurimmillaan yli puoli metriä. Rakenteesta otettiin 3D-kuvat vasta, kun se oli jo ruiskubetonoitu, mutta avonainen rako on nähtävissä myös näissä kuvissa (Kuva 31).

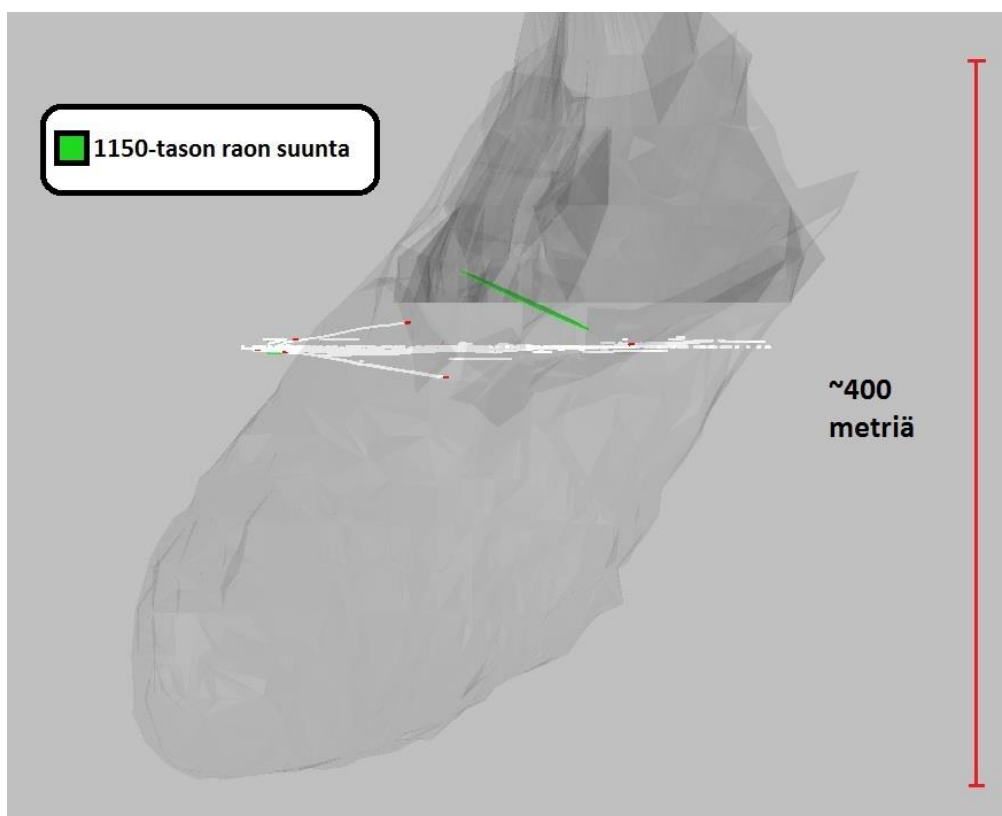


Kuva 31. Tasolla 1150, apuperässä 4, katkon 12 kohdalla oleva rako. Sijainti merkitty tasokarttaan punaisella ympyrällä. Vasemmalla oleva kuva viistosti ylhäältä päin nähtynä, oikealla oleva alhaalta päin. Raon avauma noin puoli metriä.

Kyseisessä perässä on havaittavissa lähes koko matkalla vastaavan suuntaista rakoilua (Kuva 32). Rakoilu ei rajoitu pelkästään malmion alueelle, vaan myös sivukivi on hyvin voimakkaasti rakoillutta kyseisessä suunnassa. Rakoilun kaateen suunta on noin kaakkoon/itään päin, eikä vastaavaa rakosuuntaa ole juurikaan havaittavissa muualla malmiossa. Rakoilun suuntaa esitettyä tasona kuvassa 33.



Kuva 32. Taso 1150, apuperä 4, katko 10. Lähikuva katkon takaseinästä/vasemmasta kainalosta. Kallio on hyvin tiheään rakoillutta, mutta poikkeuksellisesti rakoilu ei ole liuskeisuuden suuntaista, vaan lähes kohtisuoraan sitä vastaan.



Kuva 33. Näkyvissä taso 1175, sekä tasolla 1150 havaittujen rakojen suunta vihreällä. Katselusuunta etelästä pohjoiseen. Muualla malmiossa ei ole havaittu vastaavan suuntaista rakoilua.

5.2. Rakennegeologinen kartoitus

Pyhäsalmen malmio on rakenteellisesti melko massamaisen oloinen. Eri kokoisia ja muotoisia sulkeumia löytyy ympäri malmiota, ja mahdollisesti joitakin kerrosmaisia tai raitaisia rakenteita. Näistä rakenteista tarkemmin mallinnettiin ilmeisesti sulkeumista koostuva vyöhyke, joka oli näkyvissä useammalla tasolla. Eri malmityyppien erottaminen kuvista on hyvin haastavaa, poikkeuksena uudelleen kiteytynyt sulfidimalmi sulkeumien yhteydessä, joka näkyi kuvissa selvästi. Sivukiven puolella on havaittavissa erilaisia pegmatiittijuonia, sekä muutamia siirrostumispintoja. Muutamia poimurakenteita oli havaittavissa malmion puolella sulkeumissa. Imaña (2003) on pro gradu -tutkielmassaan kuvannut samoja, malmiossa havaittavia rakenteita. Kuvissa oli näkyvissä osa Imañan kuvaamista rakenteista, mutta kaikkea mitä Imaña näki, ei havaittu.

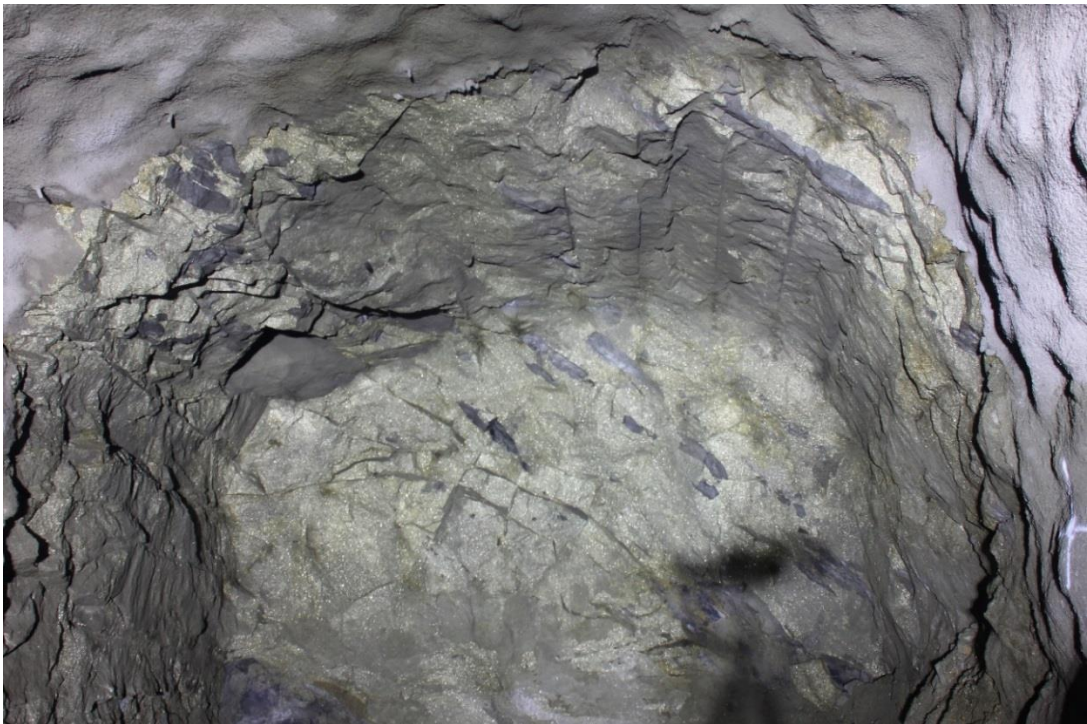
5.2.1. Sulkeumavyöhyke

Malmiossa on havaittavissa suhteellisen kapea, mutta laaja-alainen, ilmeisesti sulkeumista koostuva vyöhyke, jossa sulkeumat ovat voimakkaasti suuntautuneita (Kuvat 34 ja 35).

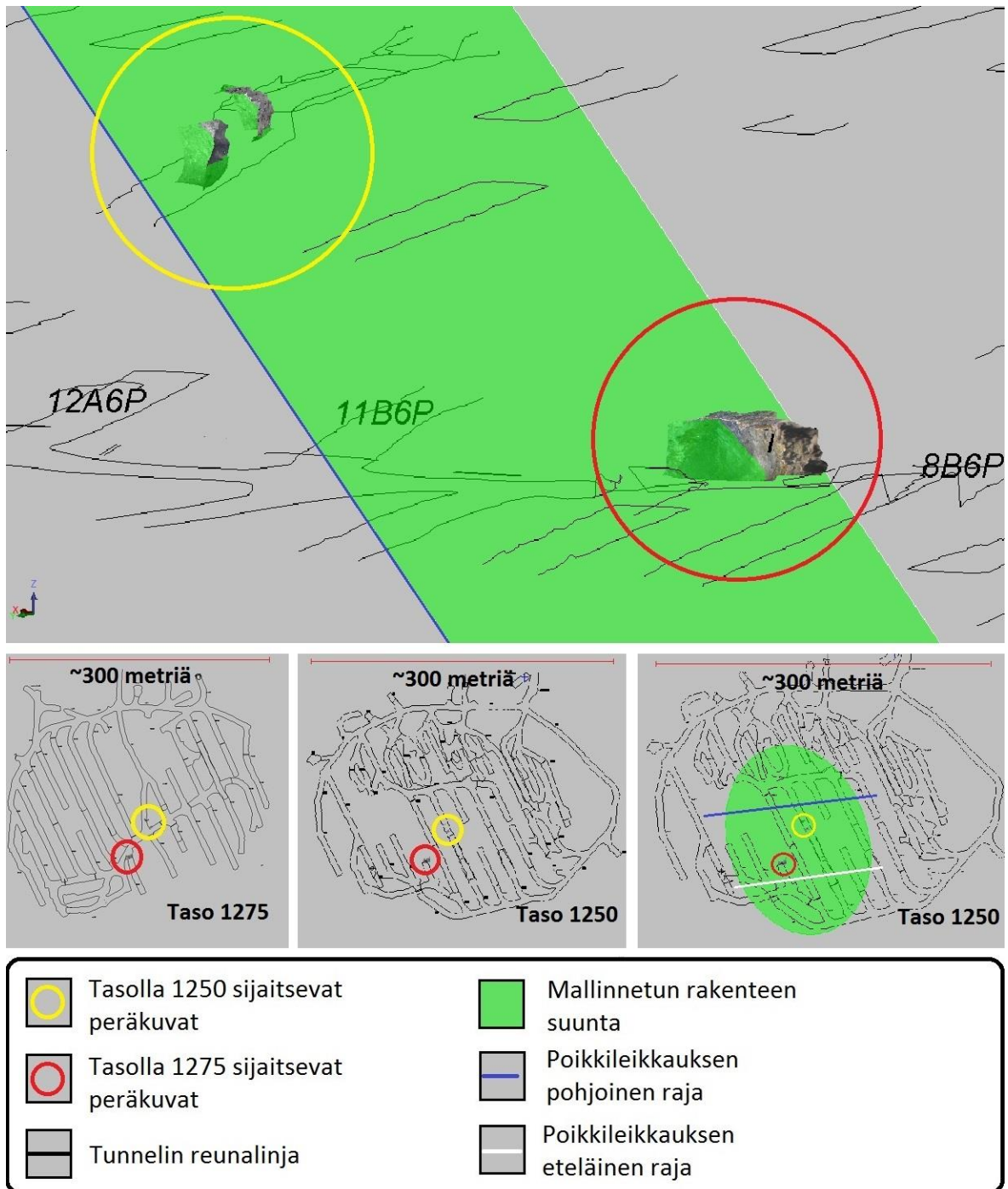
Rakenne on havaittavissa ainakin tasolla 1275 louhosperässä 9B6P sekä tasolla 1250 louhosperässä 11A7P. Structural suiten avulla rakenteesta tehtiin taso, ja tämän perusteella rakenteen suunta on 254/43 (kaateen suunta/kaade). Kuva rakenteesta tehdystä tasosta ja sen sijoittumisesta malmioon kuvissa 36 ja 37.



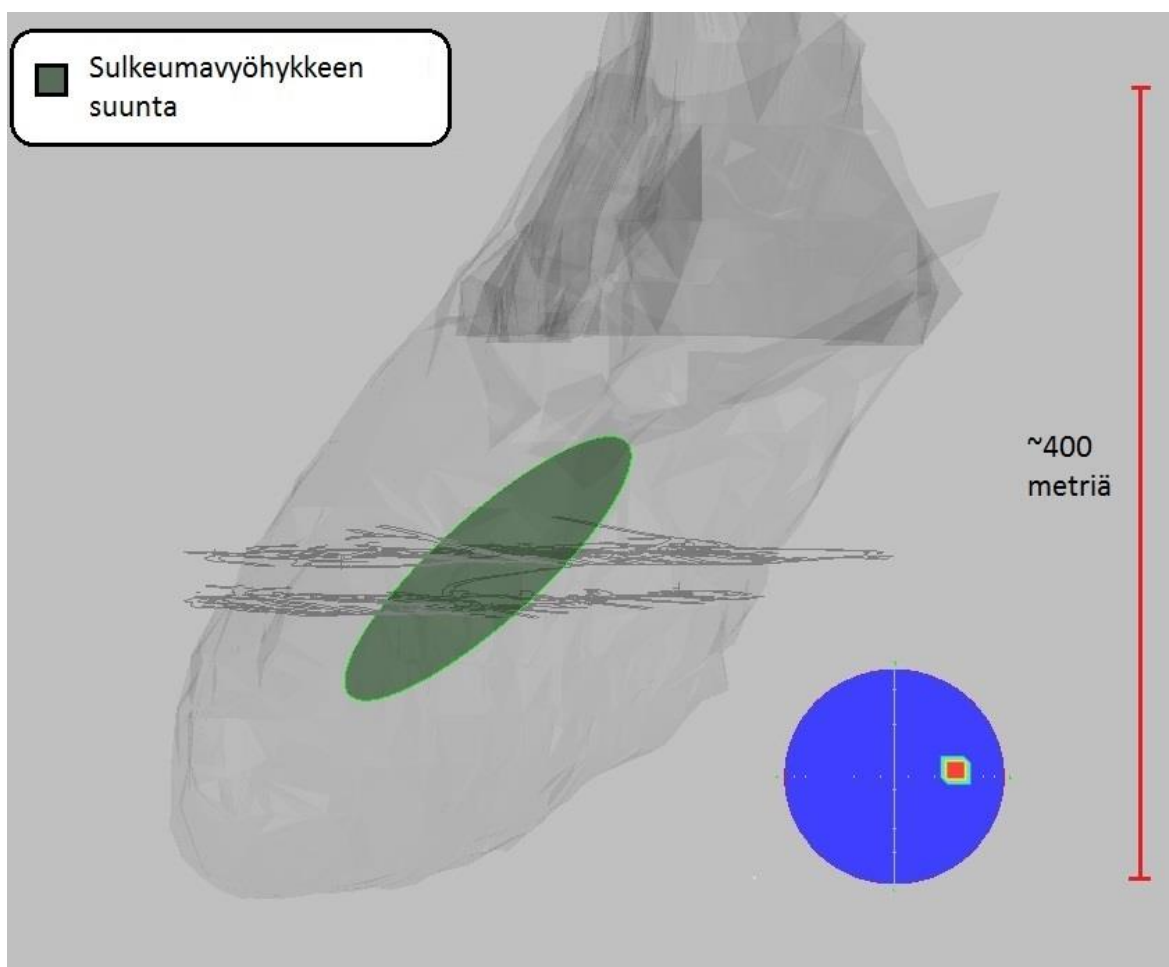
Kuva 34. Tasolla 1275, louhosperässä 9B6P havaittavissa oleva, mahdollisesti sulkeumista koostuva rakenne. Paikka osoitettu kuvassa 36.



Kuva 35. Saman suuntainen rakenne kuin edellisessä kuvassa, mutta tasolla 1250, louhosperässä 11A7P. Paikka osoitettu kuvassa 36.

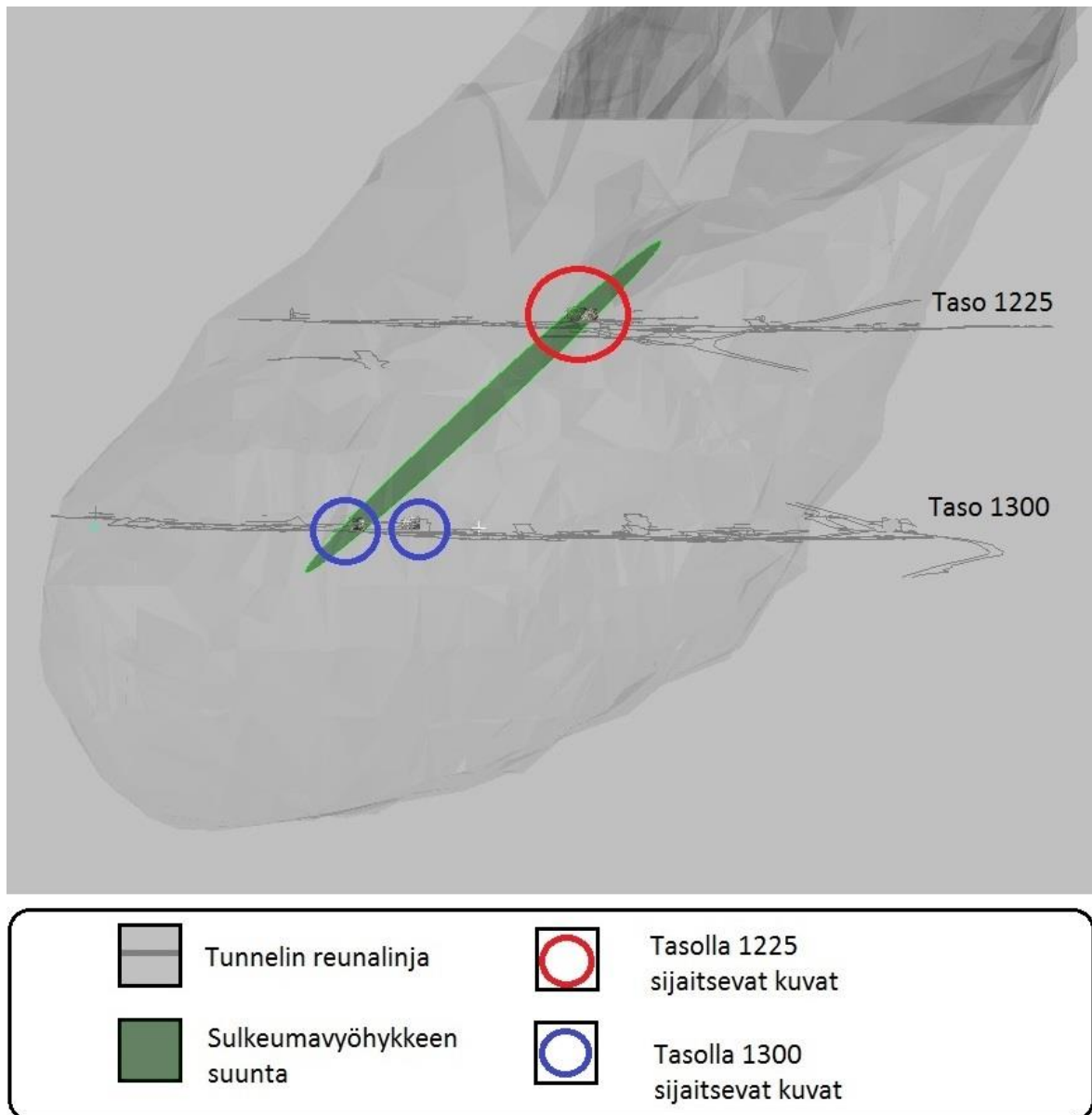


Kuva 36. Kuvien 34 ja 35 perusteella mallinnettu, sulkeumista koostuvan rakenteen suuntaa kuvaava taso.



Kuva 37. Sulkeumavyöhykkeen sijoittuminen malmioon. Katselusuunta noin lounaasta koilliseen, näkyvissä tasot 1275 ja 1250. Rakenteen suunta on noin 43/250, alapalloprojektiio rakenteesta oikealla alhaalla.

1300-tasolla louhosperässä 9B5B on myös muutamassa katkossa havaittavissa vastaava rakenne. Se ei kuitenkaan aivan osu Surpac:ssa rakenteesta tehdylle tasolle, mutta suunta on kuitenkin sama. 1300-tasolla louhosperästä 10B5P löytyy sama rakenne, joka on samalla kohdalla rakenteesta tehdyn tason kanssa. Myös rakoilu on kyseisessä kohdassa saman suuntaista ja voimakkaasti ruosteista. Tasolta 1225 louhosperästä 12A8P löytyy saman kaltaista rakennetta, joka sijaintinsa puolesta on mahdollisesti samaa rakennetta. Edellä kuvattujen rakenteiden sijoittumista malmioon ja sulkeumavyöhykkeelle esitelty tarkemmin kuvassa 38. Näiden havaintojen perusteella rakenne on mahdollisesti hyvin laaja-alainen.



Kuva 38. Samansuuntaisten rakenteiden sijoittuminen kuvassa 36 mallinnetulle sulkeumavyöhykkeelle.

5.2.2. Pegmatiittijuonet

Malmiota ympäröivissä sivukivissä on havaittavissa runsaasti erityyppisiä pegmatiittijuonia. Pegmatiittijuonten suuntia ei ole aiemmin juurikaan selvitetty. Niiden rakenteet ovat paikoitellen hyvinkin monimutkaisia, esimerkkejä kuvissa 39 ja 40. Normaalien peräkartoituksen yhteydessä pegmatiittijuonten rakenteiden kolmiulotteinen havainnointi on hyvin haastavaa.



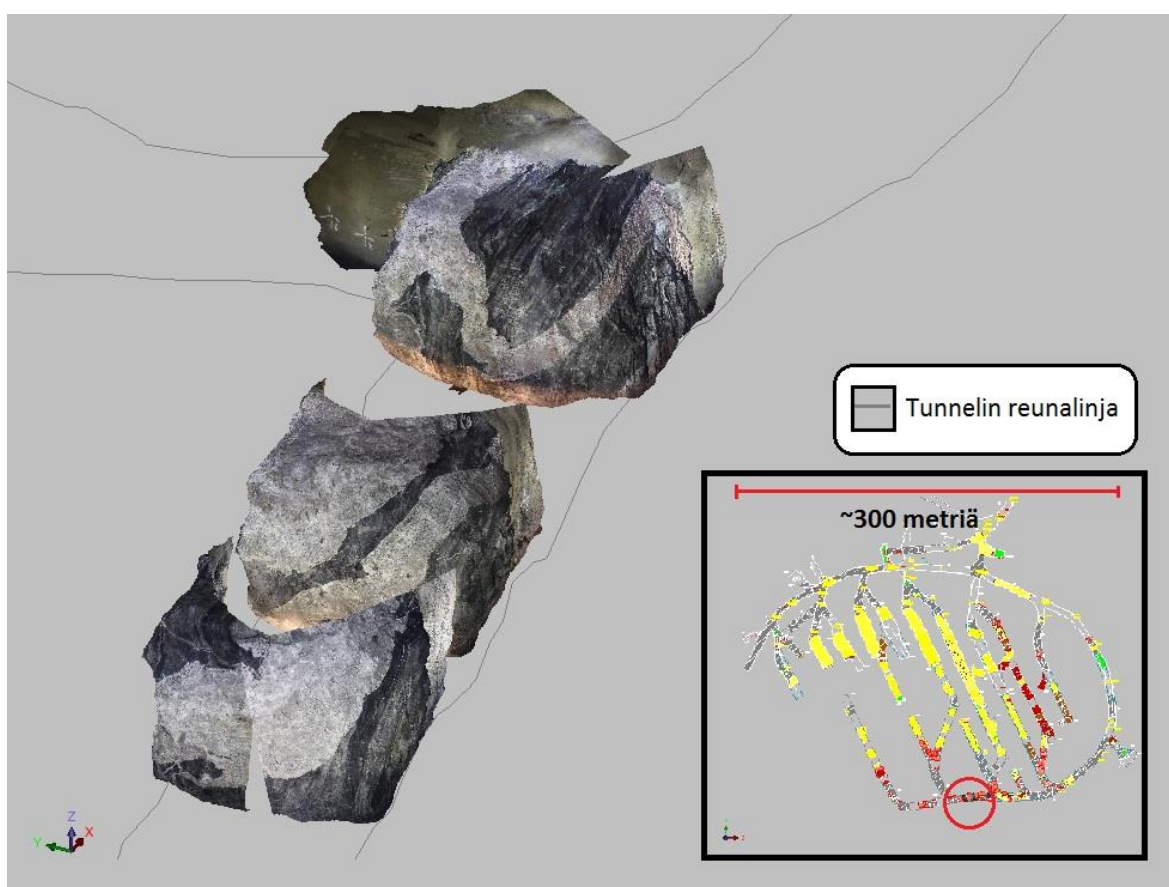
Kuva 39. Vaalea paksu pegmatiittijuoni tasolla 1200, apuperässä 1, ensimmäinen katko. Perän leveys noin kuusi metriä.



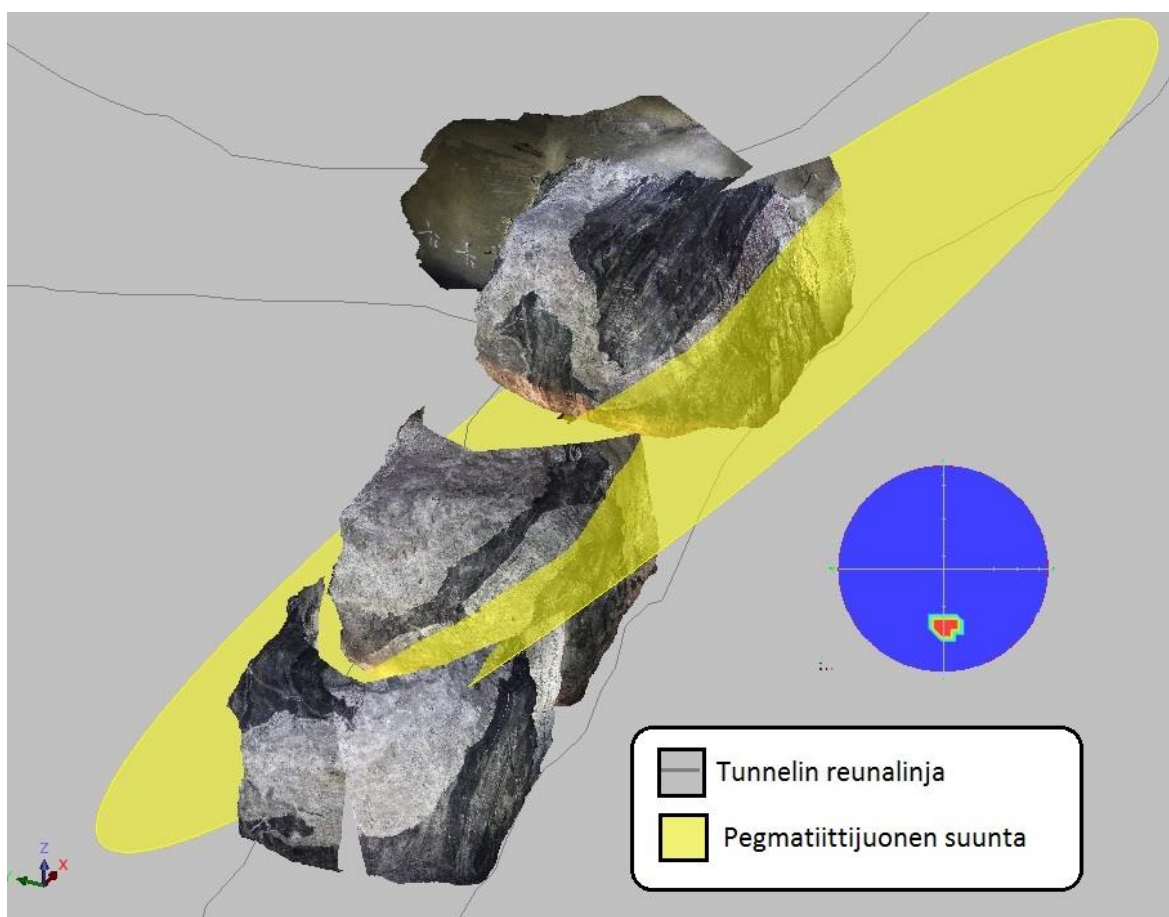
Kuva 40. Vaalea pegmatiittijuoni samalla tasolla ja perässä kuin kuvassa 39, mutta neljäs katko. Perän leveys noin kuusi metriä.

Pegmatiittijuonia pystytään 3D-valokuvien avulla tarkastelemaan Surpac:ssa useampi katko kerrallaan. Juonen kolmiulotteinen rakenne on helpommin hahmotettavissa, kun juonen näkee kerralla useamman katkon alueella, esimerkki kuvassa 41. Juonen kaadetta ja kaateen suuntaa voi tästä edelleen yrittää hahmottaa (Kuva 42).

Kokeilun vuoksi juonten mahdollisia suuntia kartoitettiin seuraavissa paikoissa: 1125-tasolla miinaperässä, 1200-tasolla apuperässä 1 ja louhosperässä 10B9P. Juonista tehtiin Structural Suite:lla tasoja, joiden avulla juonten mahdollisia suuntia pystyi mittaamaan. Tehdyt havainnot ovat hyvin tulkinnanvaraisia.

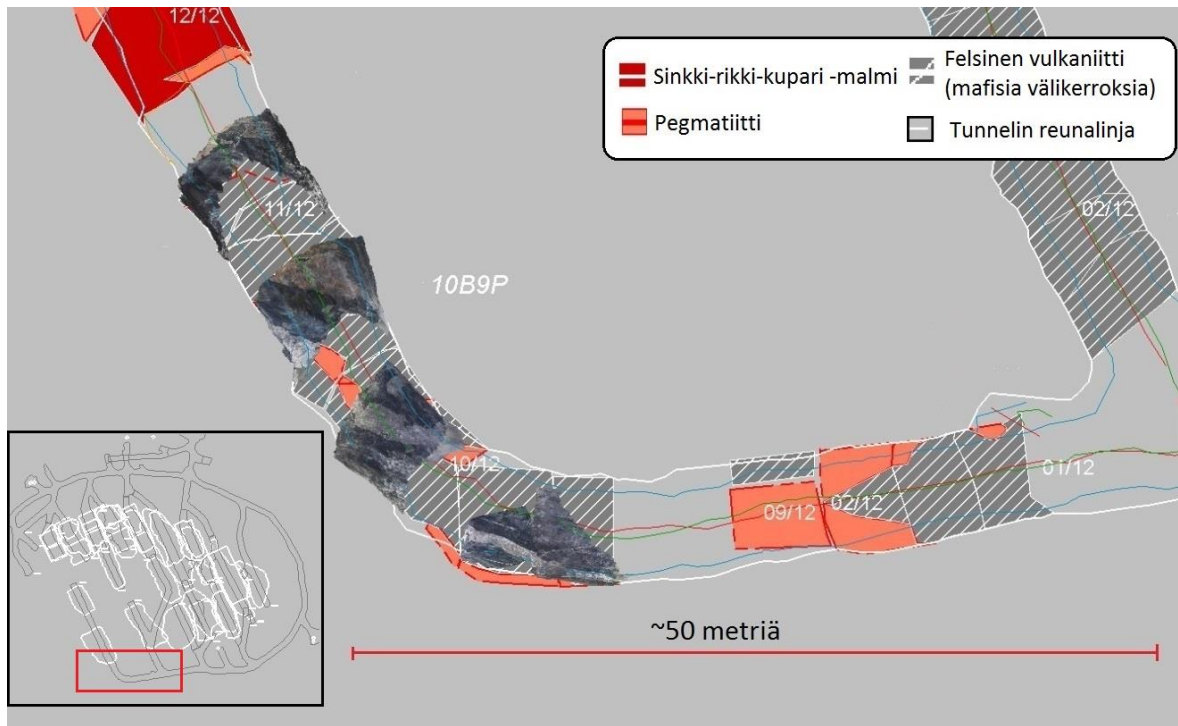


Kuva 41. Sama taso ja perä kuin kuvissa 39 ja 40, mutta 3D-kuvina tarkasteltuna. Ylimpänä ensimmäinen katko, sitten neljäs, ja lopussa kuudes katko. Juoni sijaitsee malmion eteläpuolella, kuvien tarkempi sijainti merkitty oikealla alhaalla olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä.

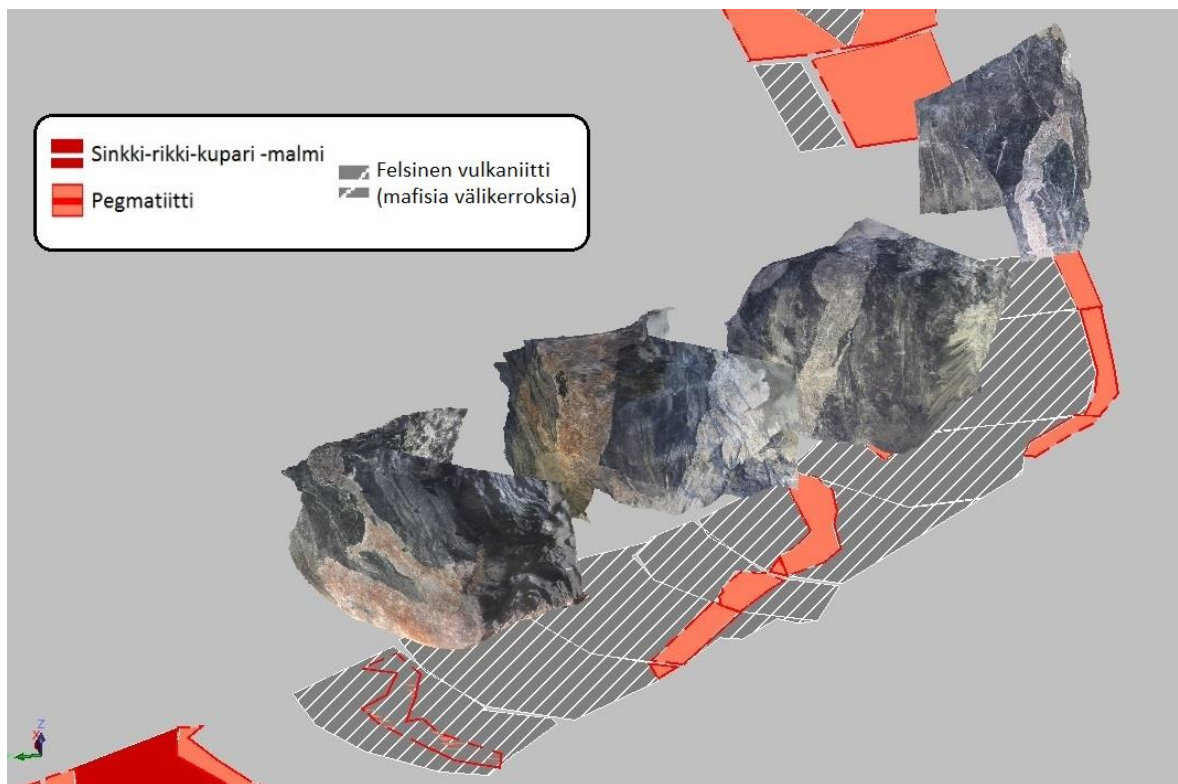


Kuva 42. Sama tilanne kuin kuvassa 41, mutta juonen suuntaa on pyritty hahmottamaan tason avulla. Suunta on noin 360/46, alapalloprojektio juonen suunnasta kuvan oikeassa reunassa.

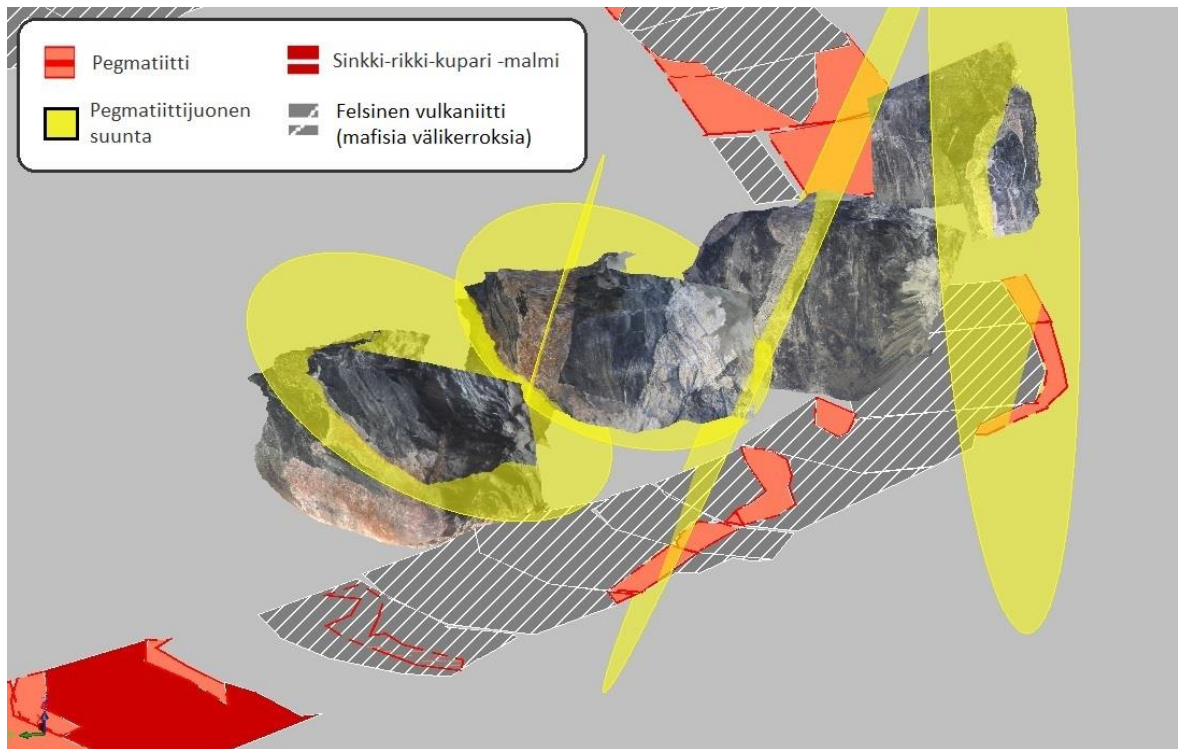
Tasolta 1200 louhosperästä 10B9P sivukiven puolelta löytyy runsaasti pegmatiittijuonia. Juonissa on havaittavissa kahta eri suuntaa: selvästi pystyt, lähes päärakosuunnan suuntaiset juonet, sekä loivemmat, lounaaseen viettävät juonet. Juonet myös vaikuttavat olevan väriltään punaisempia lähempänä malmiota. Juonia esitelty tarkemmin kuvissa 43, 44 ja 45. Samalta 1200 -tasolta, malmion eteläpuolelta apuperästä 1 löytyy toisaalta myös juoni, jonka suunta on 360/46.



Kuva 43. 3D-kuvia tason 1200 pegmatiittijuonista ylhäältä päin tarkasteltuna, pohjalla peräkartoituksen mukainen kivilajikartta. Kuvien sijainti merkitty vasemmalla alhaalla näkyvään tasokarttaan punaisella neliöllä. Pohjoinen on kuvassa ylös päin.

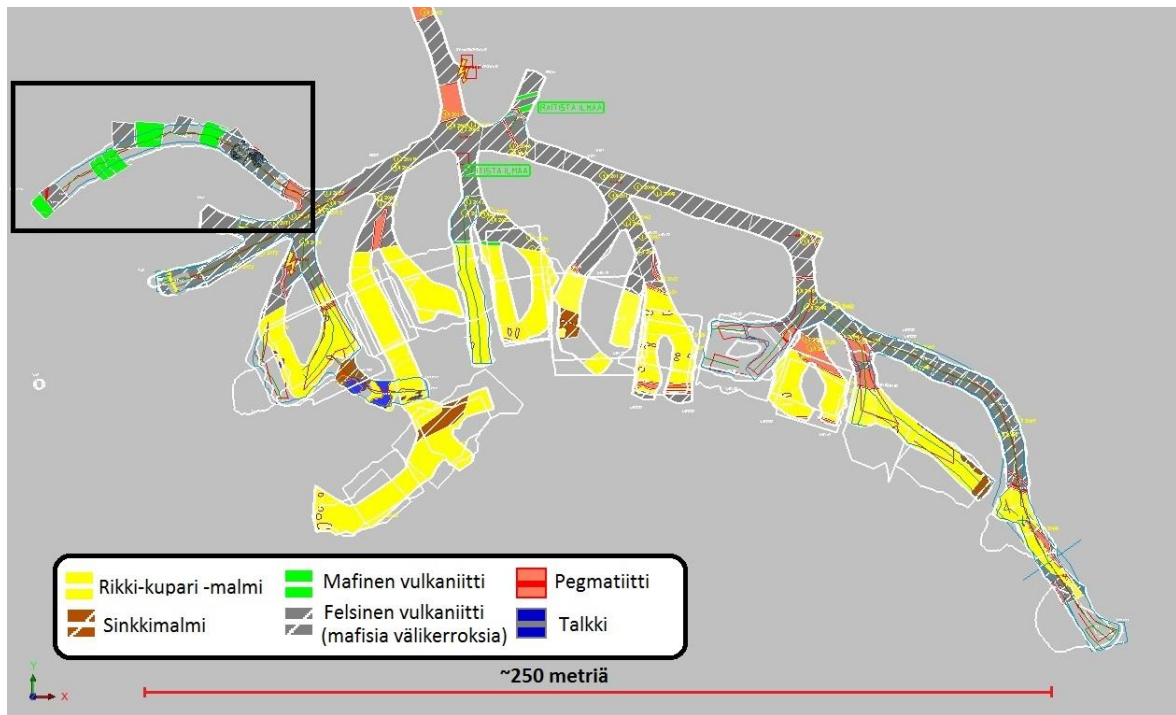


Kuva 44. Kuvan 43 tilanne luoteesta päin tarkasteltuna. Ylhäältä päin kartoitettuna vain pystyt juonet tulevat näkyviin, vaakasuuntaiset juonet saattavat jäädä kartoittamatta. Pohjoinen kuvassa vasempaan päin.



Kuva 45. Juonien mahdollisia suuntia kartoitettuna tasoina.

Miinaperä tasolla 1125 sijaitsee hieman kauempana malmiosta kuin muut tarkastellut perät. Perässä on havaittavissa vaalean- ja tummanpunaisia pegmatiittijuonia, ohuita kvartsijuonia, sekä ilmeisesti hyvin pienen mittakaavan siirtymiä. Pegmatiittijuonista kahden kaade on noin etelään päin, mutta yksi kallistuu pohjoisen suuntaan. Mahdollisen siirtymän/vanhan rakopinnan suunta on noin 170/29. Miinaperästä tehtyjä havaintoja esitelty kuvissa 46–50.



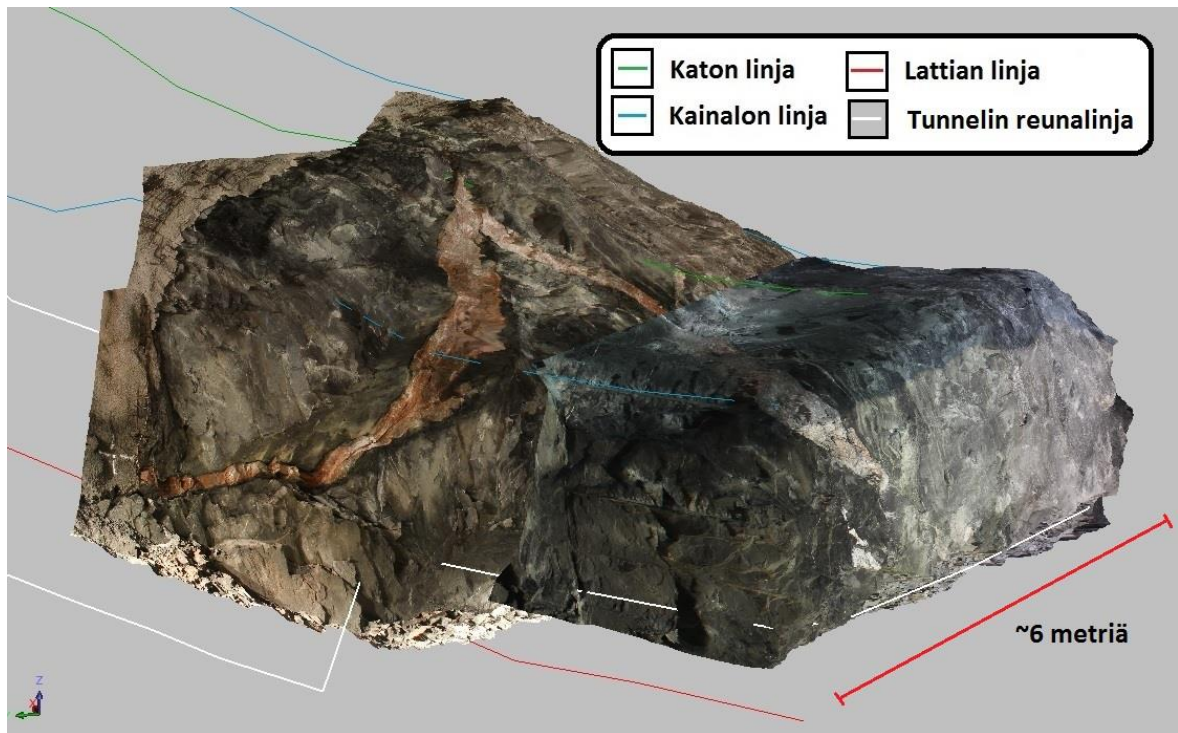
Kuva 46. Taso 1125, miinaperä rajattu mustaan laatikkoon. Pohjoinen kuvassa ylös päin.



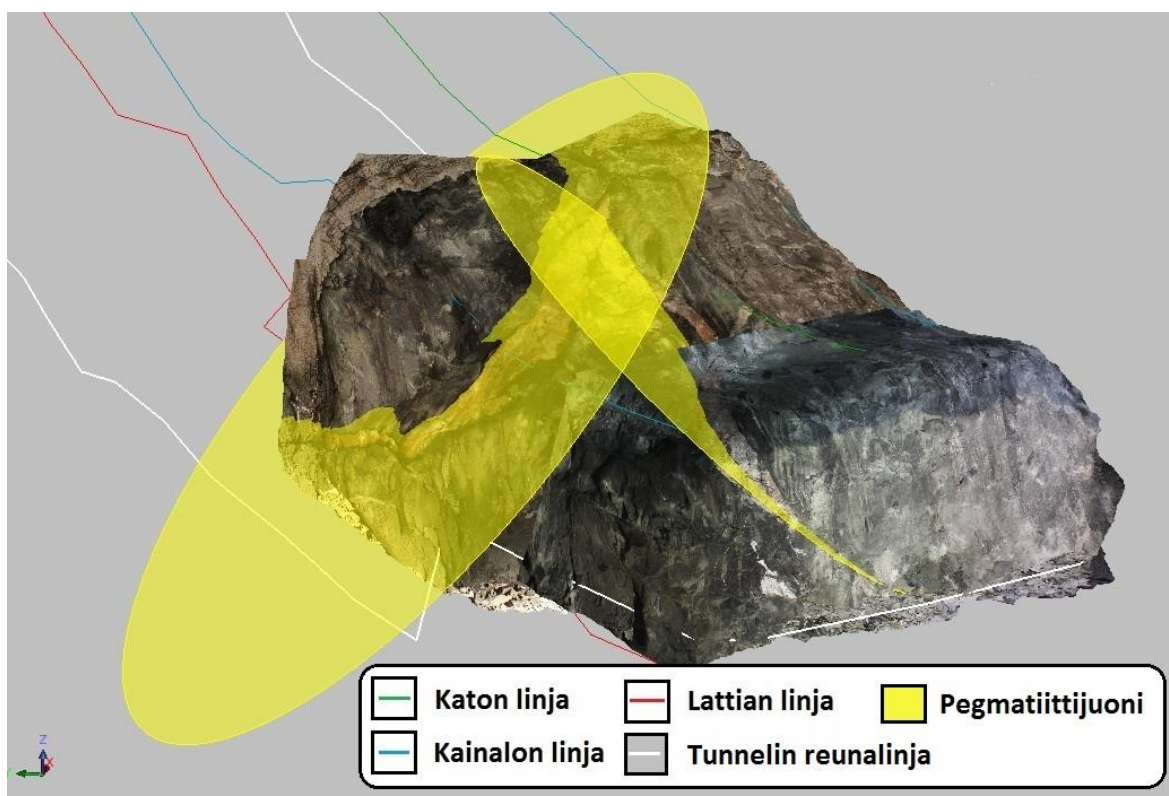
Kuva 47. Lähikuva 3D-kuvasta, taso 1125, miinaperä, katko 11. Rakopintoja, joita pitkin tapahtunut myös mahdollisesti hyvin pienimittakaavaista siirtymistä. Nuolet osoittavat kohtia, joissa mahdollinen siirtyminen on selkeimmin havaittavissa. Rako/siirrospinnan suunta noin 170/29.



Kuva 48. Taso 1125, miinaperän toiseksi viimeinen katko. Punertava mutkittileva pegmatiittijuoni, sekä ilmeisesti felsisen ja mafisen vulkaniitin kontakti (punainen katkoviiva). Perän leveys noin 6 metriä.



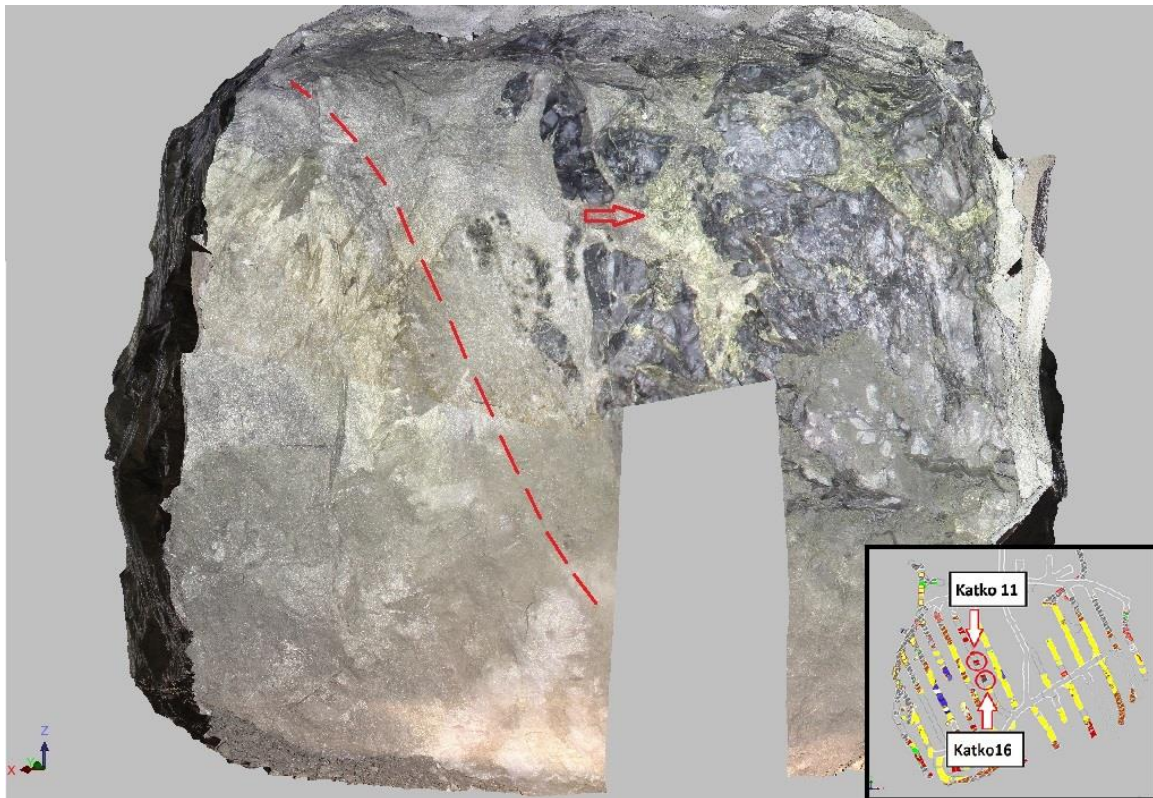
Kuva 49. Kuvan 48 katko sekä miinaperän viimeinen katko 3D-kuvana, tunnelin ulkopuolelta tarkasteltuna. Viimeisestä katkosta ei ole 3D-kuvia katkon alareunasta, vaan 3D-malli on niiltä osin jäänyt hieman vajaaksi. Katkojen väriero on luultavasti seurausta erilaisista valaistusolosuhteista.



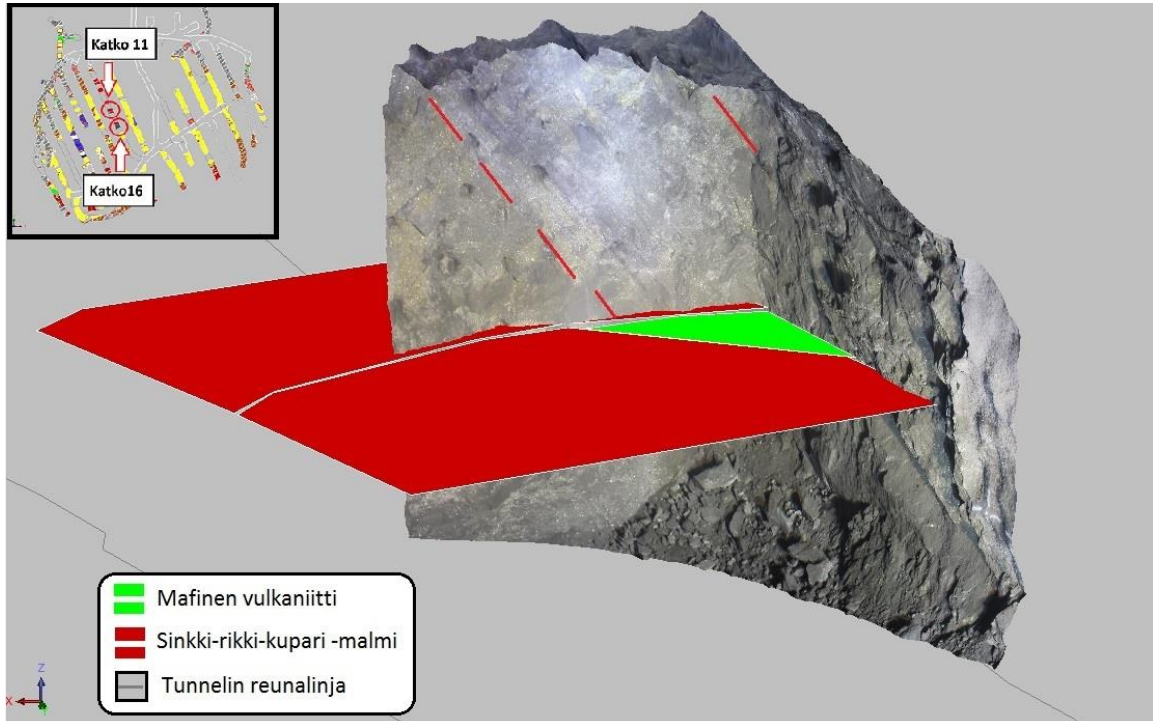
Kuva 50. Punertavan pegmatiittijuonen suuntia kartoitettuna tasoina, toisen suunnan kaade on karkeasti pohjoiseen/luoteeseen, toisen etelään/kaakkoon.

5.3. Muita havaintoja

Eri malmityyppien erottaminen kuvista on haastavaa. Ainoastaan uudelleenmobiiloitunut sulfidimalmi näkyy selvästi joidenkin mafisten sulkeumien yhteydessä, esimerkiksi tasolla 1275, louhosperässä 9A6P (Kuva 51). Samassa louhosperässä on koko perän matkalla havaittavissa jokin harmaan värinen, raitainen rakenne, joka on peräkartoituksen yhteydessä määritetty mafiseksi vulkaniitiksi (Kuva 52). Väri on kuitenkin kuvissa huono indikaattori, koska kuvien värisävyt poikkeavat valaisuolosuhteiden muutoksista johtuen suuresti toisistaan, kuten kuvasta 49 näkyy.

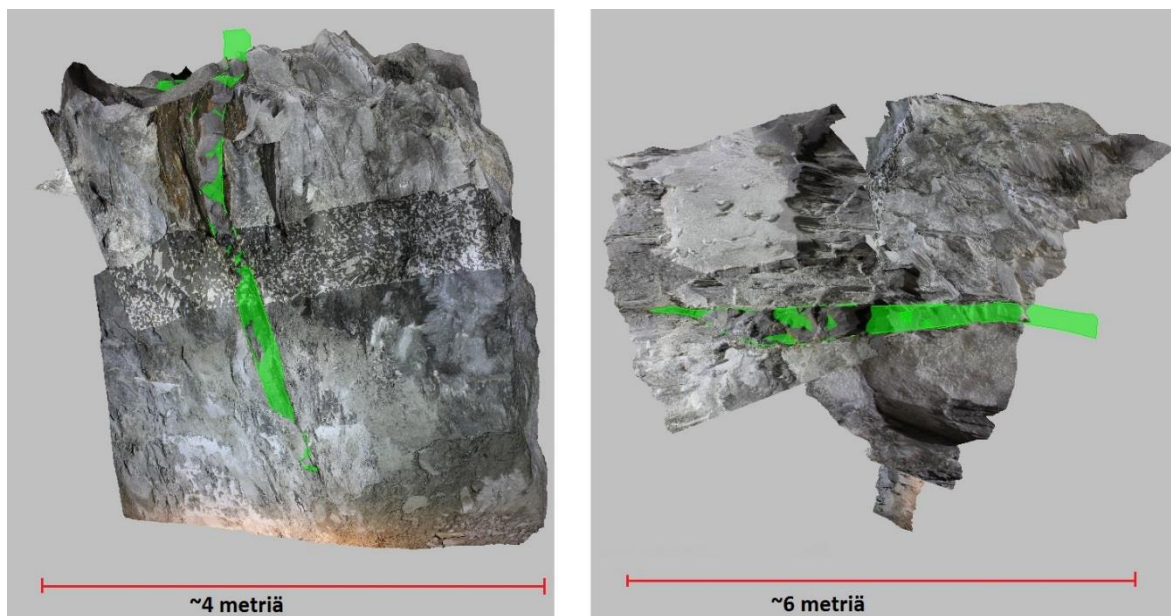


Kuva 51. Kuva tasolta 1275, louhosperästä 9A6P, katko 16. Sijainti merkitty oikealla alhaalla olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä. Nuoli osoittaa uudelleenmobiiloitunutta sulfidimalmia mafisten sulkeumien yhteydessä. Lisäksi havaittavissa raitainen rakenne lähes koko louhosperän matkalla (punainen katkoviiva).



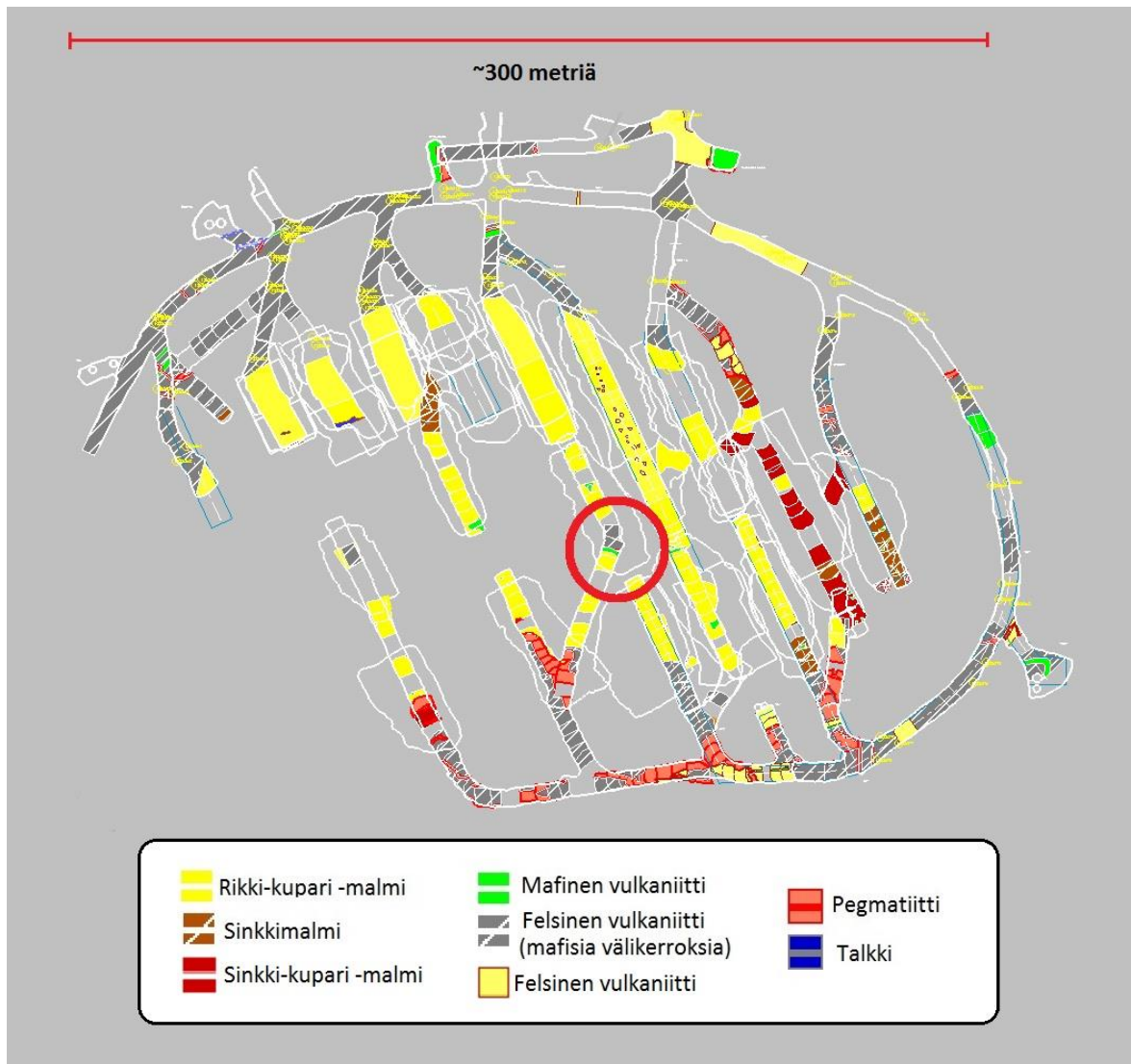
Kuva 52. Sama perä kuin kuvassa 51, mutta katko 11. Näkyvissä myös peräkartoitus. Punaisella katkoviivalla rajattuna raitainen rakenne, joka on kartoitettu mafiseksi vulkaniitiksi.

Tasolla 1175 louhosperässä 9A10P on havaittavissa mafinen juoni suuren talkkisulkeuman sisällä. Juoni kokeiltiin mallintaa Surpac:ssa digitoimalla juonen ääriviivat kahden katkon matkalta suoraan kuvan päälle (Kuva 53). Mallinnetun juonen suunnaksi saatiin mitattua 170/73.

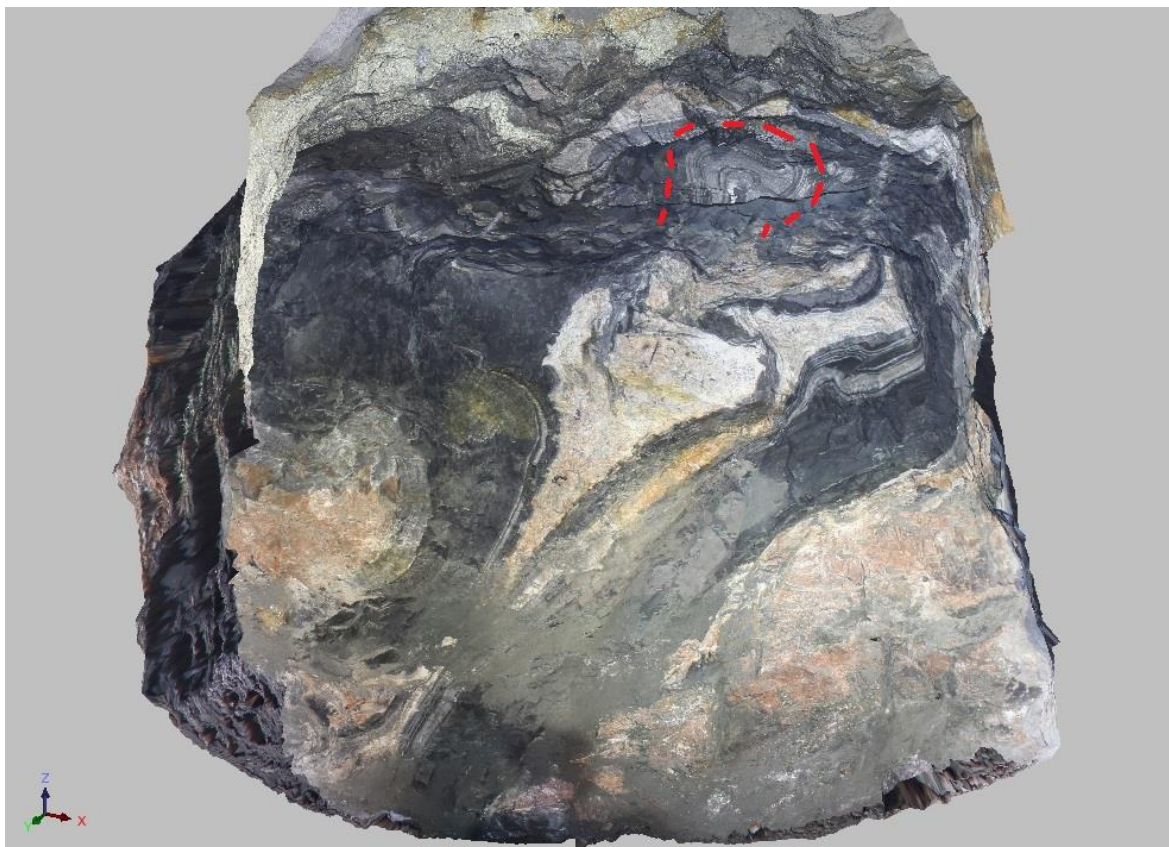


Kuva 53. Tasolla 1175 louhosperässä 9A10P sijaitsevan suuren talkkisulkeuman sisällä sijaiseva mafinen juoni, joka digitoitu 3D-kuvaan vihreällä värillä. Vasemmalla oleva kuva sivusta päin tarkasteltuna, oikealla ylhäältä päin. Juonen suunta noin 170/73.

Tasolla 1200 louhosperässä 14C9P sijaitsee keskellä malmiota jokin hyvin vaikeasti tulkittava rakenne, joku koostuu ilmeisesti ainakin suuresta voimakkaasti poimuttuneesta sivukivisulkeumasta sekä pegmatiiteista. Rakenne on havaittavissa katkoissa 21 ja 22, kuvassa 55 katko 21. Rakenteen sijainti tasolla 1200 merkitty karttaan 54 punaisella ympyrällä. Mittauksia rakenteiden suunnista ei ole tehty.

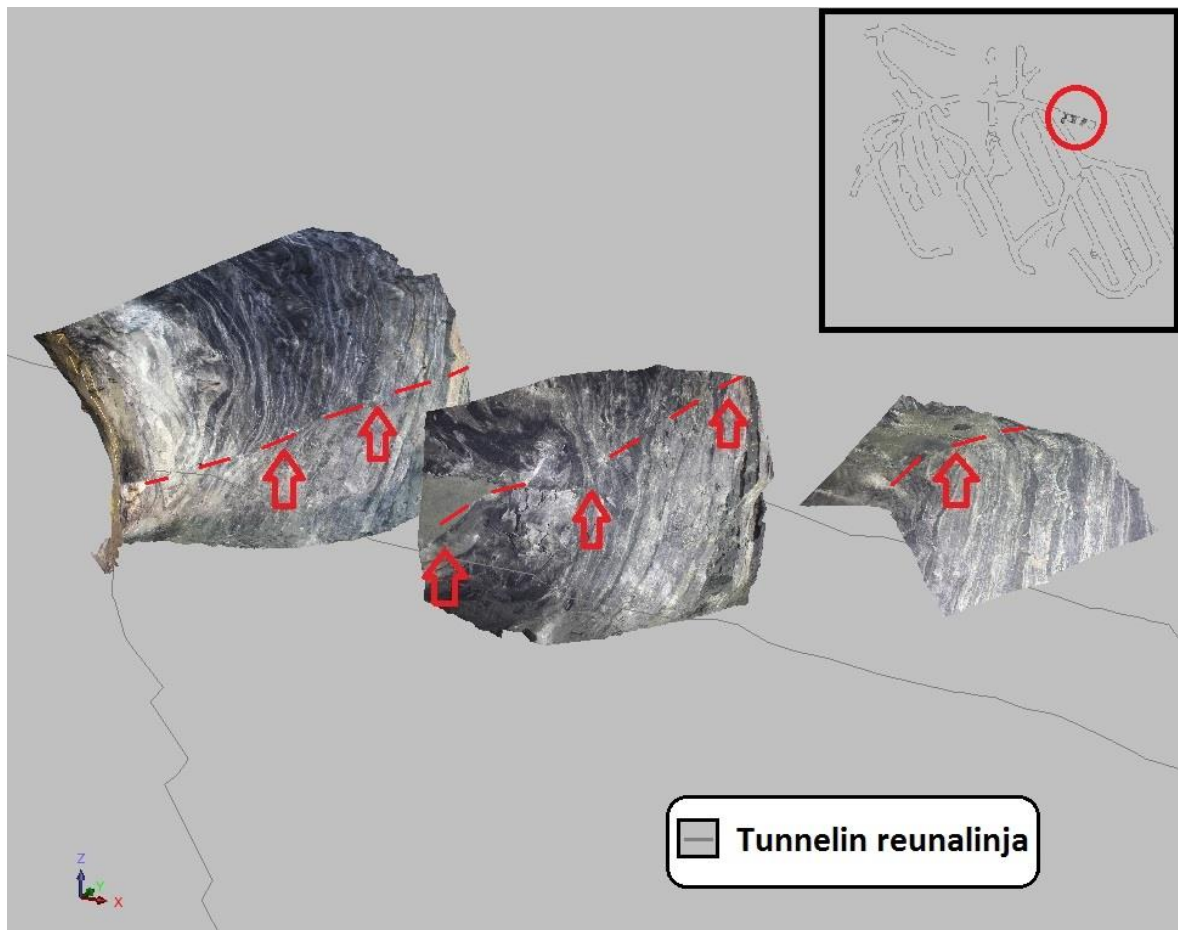


Kuva 54. Taso 1200, peränajon yhteydessä kartoitettu kivilajikartta. Punaisella ympyrällä merkitty kuvan 55 sijainti. Pohjoinen kuvassa ylös päin.

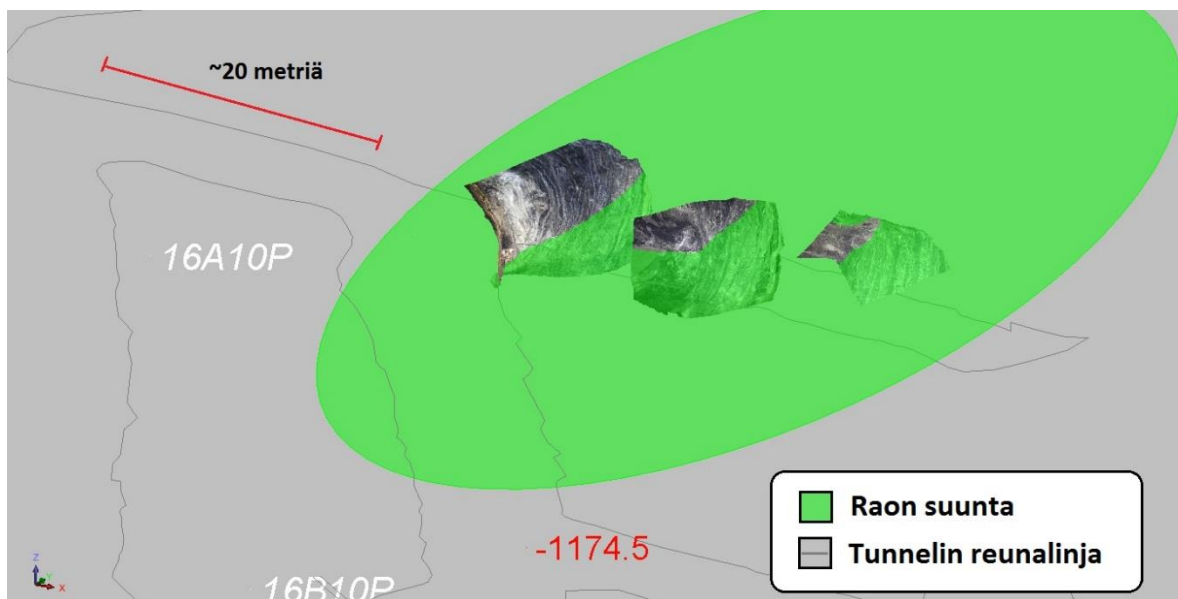


Kuva 55. Taso 1200, louhosperä 14C9P, katko 21. Sijainti tasolla merkitty kuvaan 54 punaisella ympyrällä. Kuvan katselusuunta viistosti alhaalta ylös päin. Katossa havaittavissa tiukka poimu, josta ei kuitenkaan ole liusketasoa näkyvissä. Mittauksia ei ole tehty.

Tasolla 1175 apuperässä 1 on nähtävissä loiva rako/siirropinta, jota pystyy seuraamaan viiden katkon verran ennen kuin se siirtyy tunnelin katon puolelle. Structural Suite:n avulla raosta mallinnettiin taso. Rakopinta vaikuttaisi olevan vanha siirropinta, mutta siirtymän suunnan määrittäminen on haastavaa. Rakoa esitelty kuvissa 56, 57 ja 58.



Kuva 56. Oikealle ylhäälle tasokarttaan merkitty kuvien sijainti tasolla 1175, varsinaisessa kuvassa näkyvissä 3D-kuvia apuperän 1 katkoista 1, 3 ja 5. Näkymä tunnelin ulkopuolelta tarkasteltuna. Punaiset nuolet ja katkoviiva osoittavat rakoja/siirrostasoa.



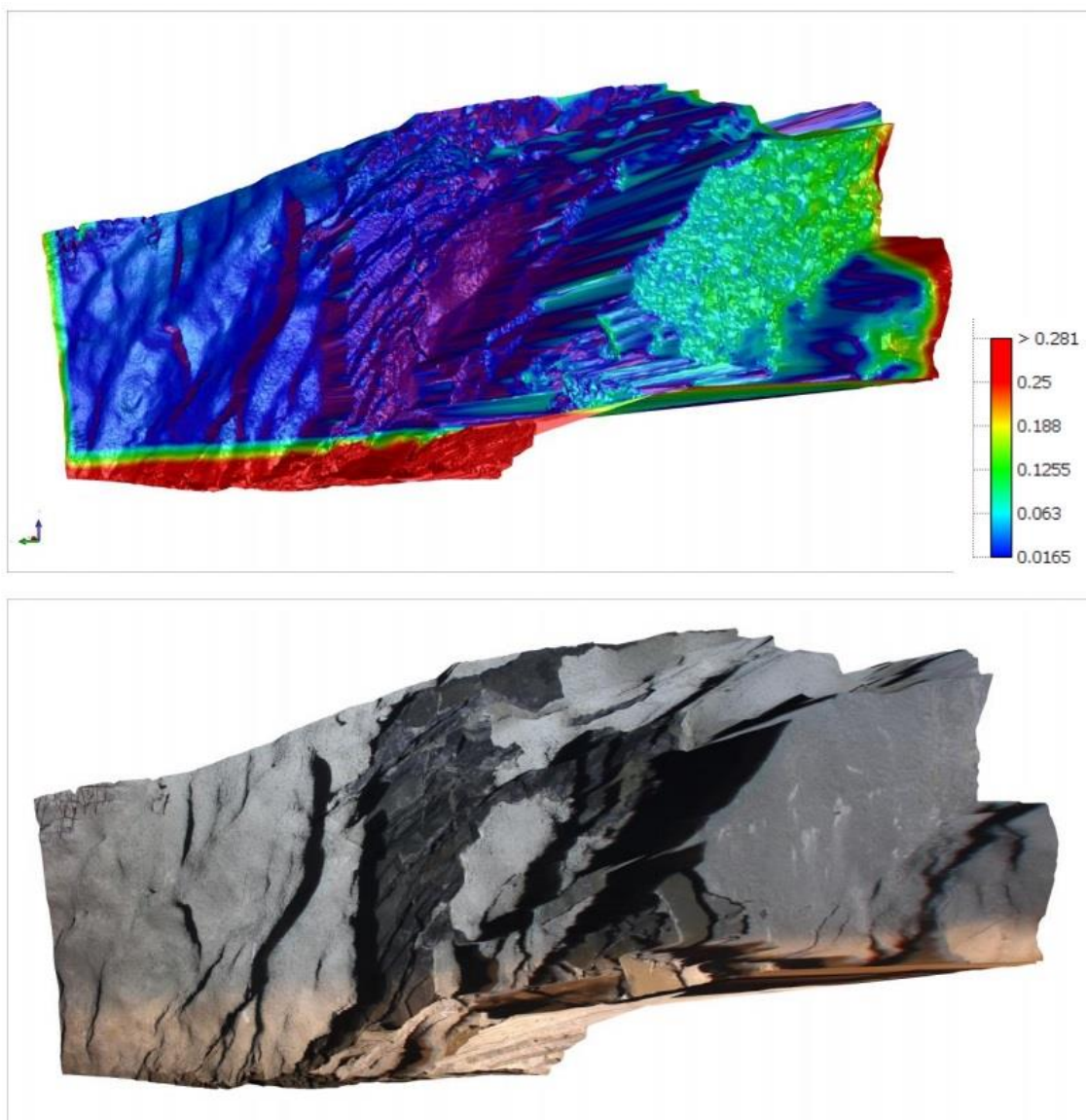
Kuva 57. Sama tilanne kuin kuvassa 56, mutta rako/siirrostaso mallinnettu Structural Suite:n avulla.



Kuva 58. Kuvien 56 ja 57 rako/siirrospinta lähemmin tarkasteltuna katkossa 3. Tasoa pitkin vaikuttaa tapahtuneen liikettä, mutta liikkeen suunta on epäselvä. Punaiset nuolet osoittavat rakoja/siirrospintaa.

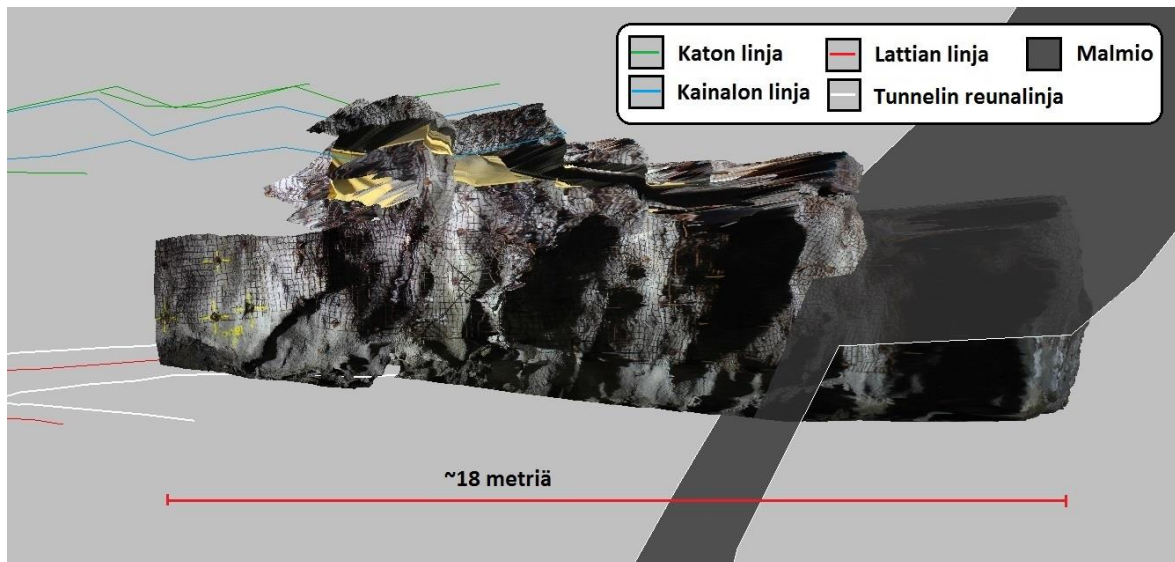
5.4. Siirtymien seuranta

3D-kuvien luominen osoittautui yllättävän haastavaksi siirtymäkohdista otetuista kuvista. Myöskin kuvien vertailu Surpac:n versiolla 6.3 osoittautui vaikeaksi. Kyseinen versio ei sisällä työkalua, jolla dtm-tasoja saisi vertailtua päällekkäin. Kuvassa 59 on kuitenkin Surpac:n versiolla 6.6 tehty vertailu, jossa on vertailtu päällekkäin tasolta 1275 perästä 4 kahtena eri päivänä otettuja kuvia. Kuvista tehtiin ensin dtm-tiedostot, jonka jälkeen dtm-tasoja vertailtiin päällekkäin. Värisävy kertoo tasojen välisen etäisyyden toisistaan. Mittapisteiden koordinaatit käytiin mittaamassa seurannan alussa ja sijainnin oletettiin pysyvän muuttumattomana koko seurannan ajan.



Kuva 59. Taso 1275, perä 4. Alempana 3D-kuva paikasta, ylempänä Surpac:ssa tehty dtm-tasojen vertailu. Kahdesta erillisestä, eri päivänä kuvatusta 3D-kuvasta luotiin ensin dtm-tasot, jonka jälkeen niitä vertailtiin päällekkäin. Väri kertoo, kuinka kaukana dtm-tasot ovat toisistaan, violetin värin alueella erot ovat 1-2mm, vihreän värin alueella noin 12cm. Kuvat oli otettu 9.3. ja 11.3., joten havaittu ero ei voi johtua liikkeestä. 11.3. otetut kuvat olivat aavistuksen väärin tarkennettu tai tärähtäneitä, millä on mahdollisesti vaikutusta 3D-mallien tarkkuuteen. Dtm-tasot eivät olleet täysin saman muotoisia, mistä johtuen reunat näkyvät punaisella värillä. Kuvassa näkyvän tunnelinpätkän pituus noin 12 metriä. Kuva Jaakko Ingerttilä/WSP Finland Oy.

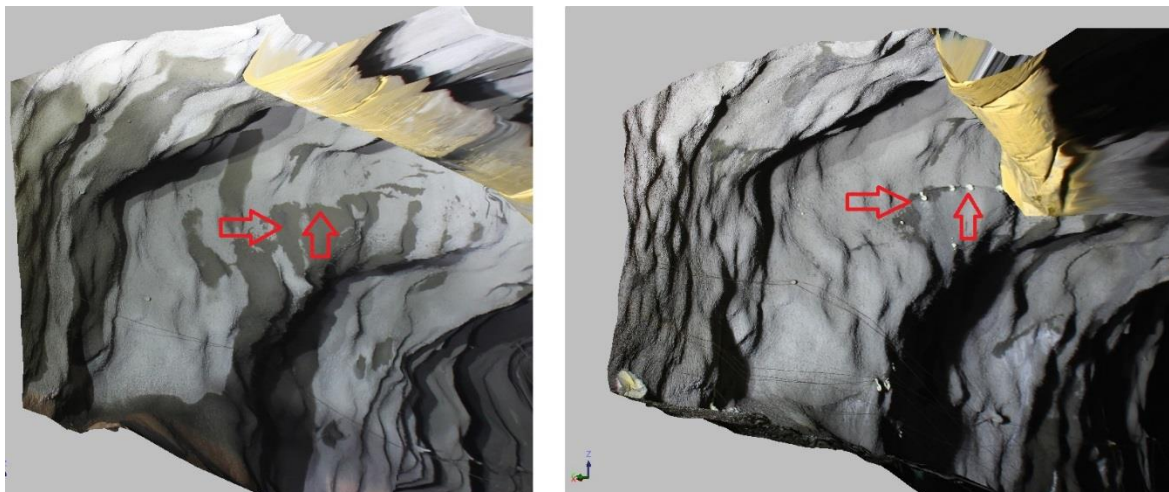
Kontaktikohdista otetuista 3D-valokuvista näkyy hyvin siirtymäkohtien 'porrasmainen' rakenne (Kuva 60). Liike ei ole rajoittunut vain malmion vajoamiseen, vaan myös sivukivet ovat liikkuneet. Sivukiven liuskeinen ja pysty rakenne on luultavasti osaltaan vaikuttanut tähän; sileät ja tasaiset liuskepinnat ovat toimineet liukupintoina. Samaan tulokseen tulivat myös Bergström et al. (2014). Siirtymäpinnoista mallinnettiin tasoja (Kuva 66).



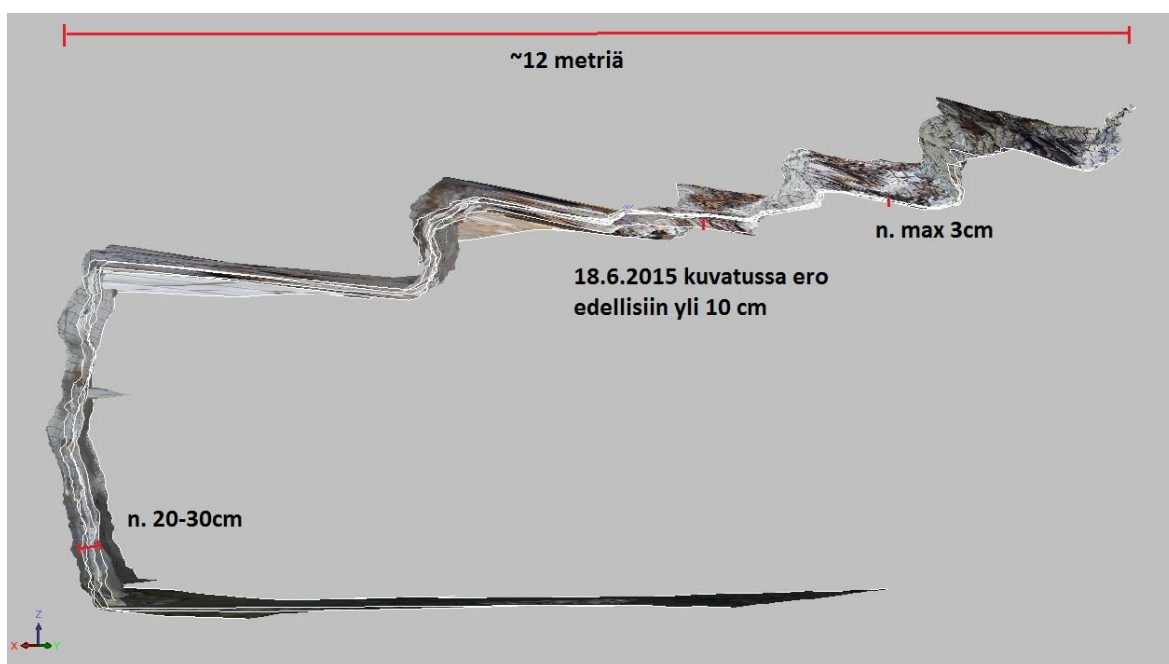
Kuva 60. Taso 1200, perä 9. Malmion ja sivukiven kontakti viimeisen ”portaana” kohdalla (tumman harmaa taso). Tunneli on selvästi vajonnut alaspäin porrasmaisesti.

Eri päivinä otettuja 3D-kuvia vertailtiin avaamalla ne Surpac:ssa päällekkäin, ja leikkaamalla niistä leikkaustyökalulla siivuja. Siivuista yritettiin mitata eri päivinä otettujen kuvien välisiä etäisyyksiä Surpac:n mittaustyökalun avulla. Tässä tutkielmassa esitellään tasolla 1200 perässä 9 otetuista kuvista tehtyjä vertailuja, sekä tasolla 1300 perässä 4 otetuista kuvista tehtyjä mittauksia (Kuvat 62, 63, 64 ja 65). Siirtymän vajoaman suuruutta yritettiin arvioida vertaamalla vajonneen tunnelin kattolinjaa alkuperäiseen, mitattuun kattolinjaan. Esimerkkinä tason 1250 siirtymä perässä 9 (Kuva 66). Tasolla 1274, perässä 4 tehtiin mittauksia eri päivinä otetuista 3D-kuvista, ja vertailtiin, tapahtuuko näkyvillä olevissa liuskepinnoissa muutoksia (Kuva 68). Tasolla 1300 perässä 3 on selvästi havaittavissa, kuinka vieressä tapahtuva louhoksen louhinta aiheuttaa rakojen syntyä ehjään ruiskubetoniin (Kuva 61).

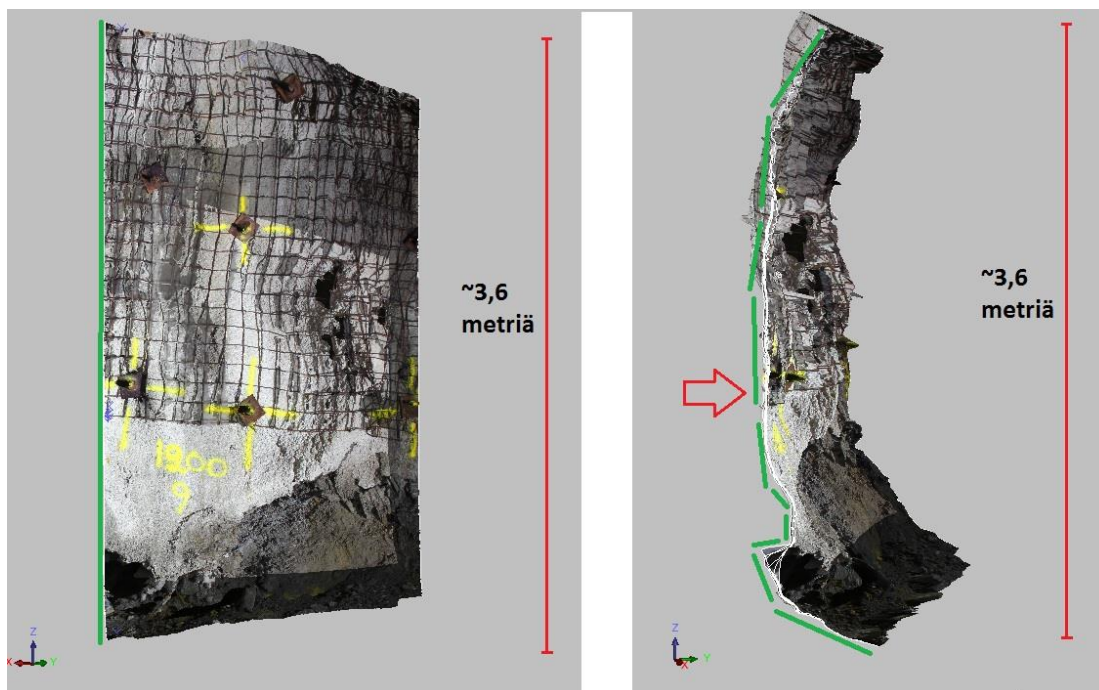
Siirtymäkohdista otettujen 3D-kuvien suurin ongelma on, etteivät eri päivinä otetut kuvat osu Surpac:ssa ”päällekkäin”. Ongelma näkyy selvimmin kuvissa 62-65. Eri päivinä otettujen kuvien välinen etäisyys kasva sitä suuremmaksi, mitä kauemmas siirrytään mittapisteistä. Toisaalta eri päivinä otetut kuvat eivät aina täysin osu kohdilleen mittapisteiden läheisyydessäkään (Kuva 64). Useimmissa tapauksissa kyse ei voi olla kallion liikkeestä. Kuitenkin hyvin suuret muutokset kuvattavalla alueella ovat havaittavissa (Kuva 65).



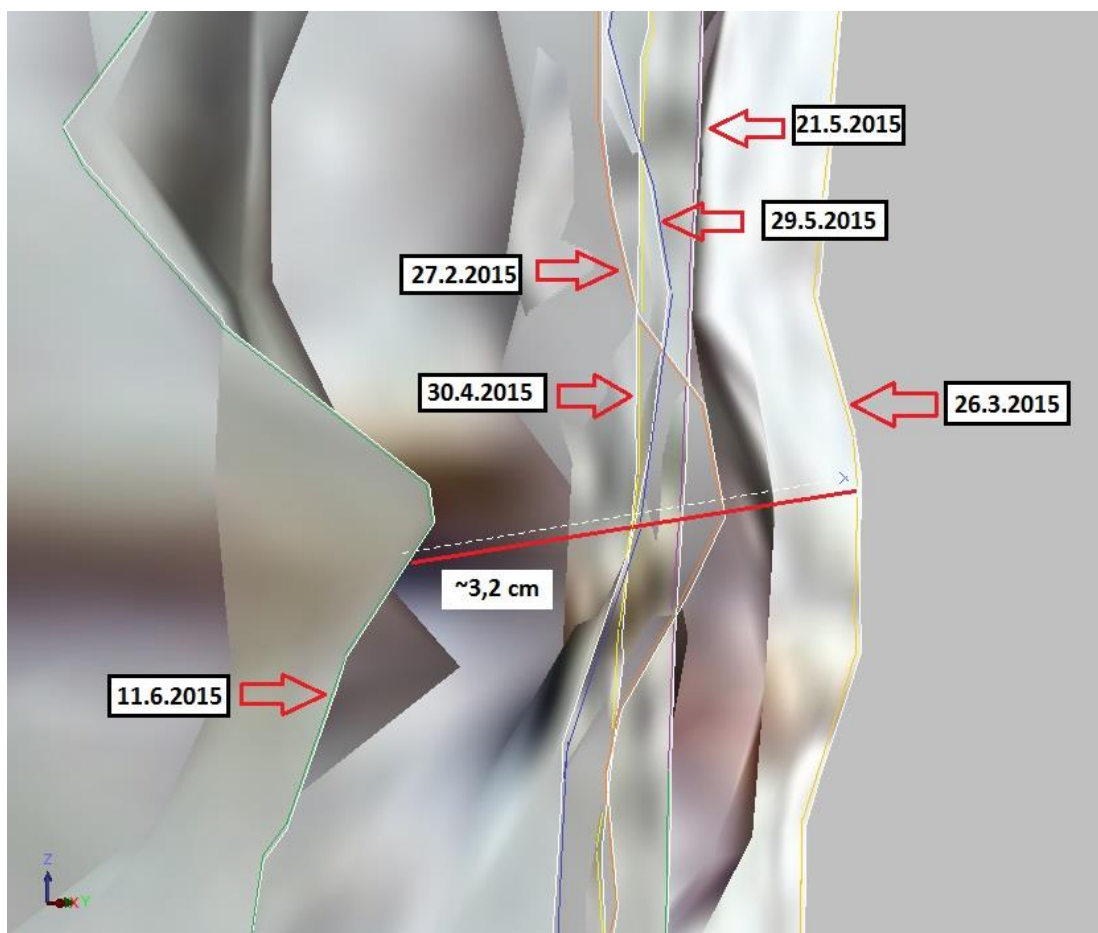
Kuva 61. Taso 1300, perä 3. Vasemmalla oleva kuva otettu 21.5., oikealla oleva 11.6. Kuvia lähemmin tarkasteltaessa huomaa, kuinka rakoja on ilmestynyt lisää louhinnan alettua kontaktikohdan vieressä, ja kuinka raot ovat alkaneet leventyä.



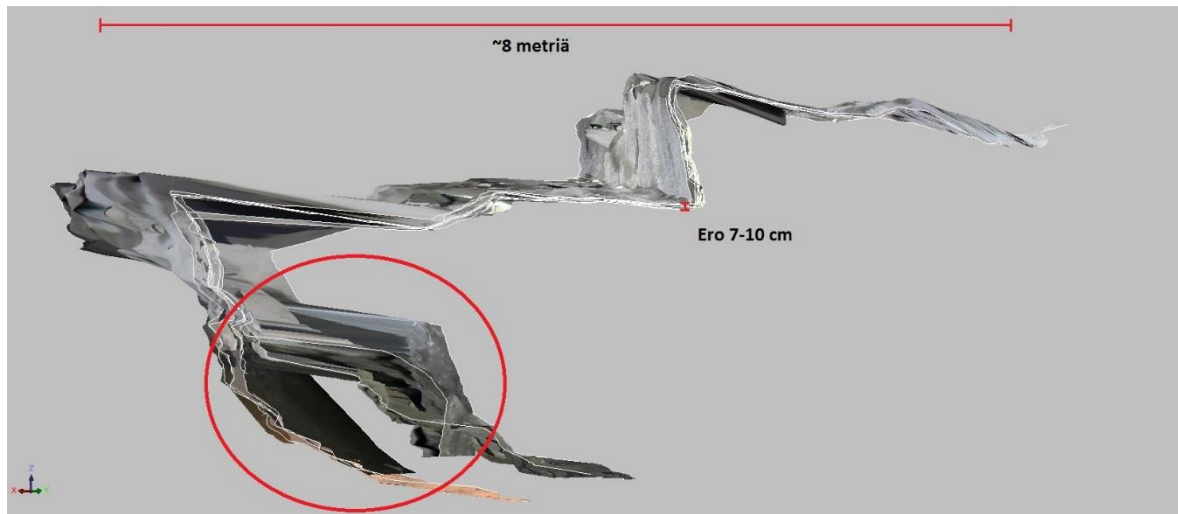
Kuva 62. Siirtymäkohta tasolta 1200, perä 9. Mittapisteet olleet kuvan oikeassa reunassa. Poikkileikkaus tunnelin pituussuunnassa, kuvia yhteensä viideltä eri päivältä. Eri päivinä otetut kuvat näkyvät erillisinä valkoisina viivoina. Mittapisteiden läheisyydessä kuvien välinen etäisyys noin kolme senttimetriä, mutta etäisyys kasvaa mitä kauemmas siirrytään mittapisteistä, ollen enimmillään lähes 30 cm. Pahiten heittoa on 18.6. otetussa kuvassa, jonka etäisyys edellisiin kuviin on yli 10 cm.



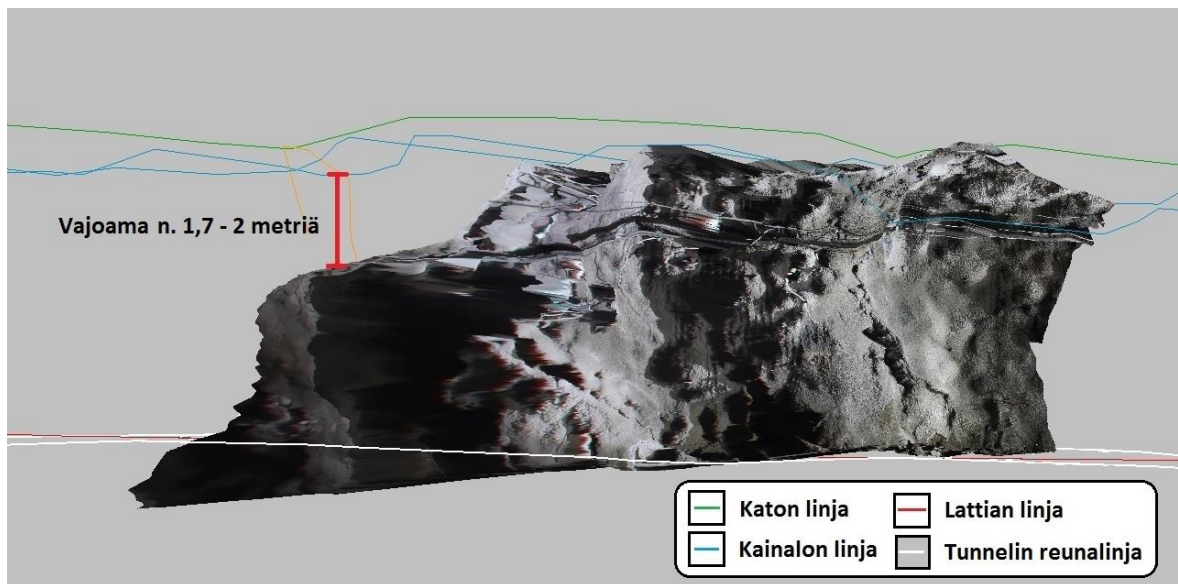
Kuva 63. Siirtymäkohta tasolta 1200, perä 9. Poikkileikkaus mittapisteiden kohdalta. Kuvia yhteensä kuudelta eri päivältä. Oikeanpuolimmaiseen kuvaan merkattu punaisella nuolella kohta, jota tarkasteltu lähemmin kuvassa 64.



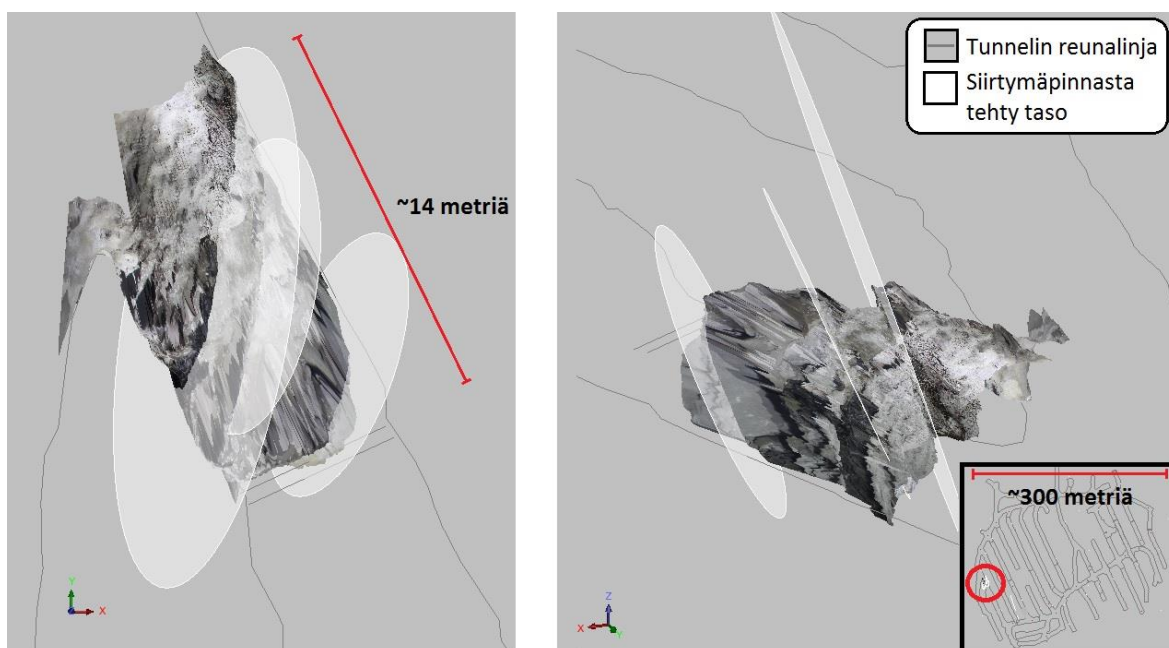
Kuva 64. Kuvassa 63 merkitty kohta lähemmin tarkasteltuna. Eri väriset viivat kuvaavat eri päivinä otettuja kuvia. Surpac:n mittaustyökalun avulla mitattuna 26.3.2015 ja 11.6.2015 otettujen kuvien väliseksi etäisyydeksi saadaan noin 2-4 cm, muina päivinä otettujen kuvien väliset etäisyydet joitakin millimetrejä.



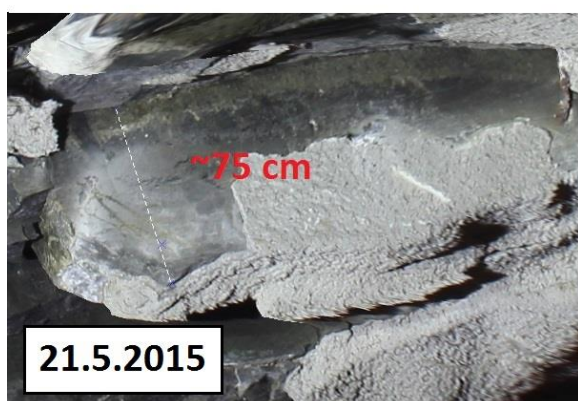
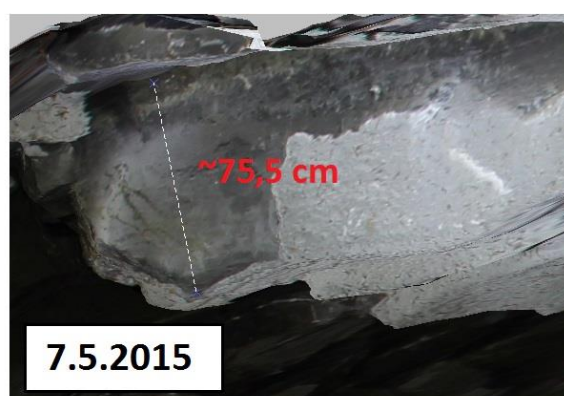
Kuva 65. Tason 1300, perän 4 siirtymäkohta. Perän takaosaan lastattu jossain vaiheessa kiviä, mikä näkyy hyvin suurena heittona eri päivinä otettujen kuvien välisissä etäisyyksissä, kohta merkitty punaisella ympyrällä. Muutoin heittoa kaikkien kuvien välillä vaikuttaisi olevan ensimmäisen kynnyksen kohdalla noin 7-10 cm.



Kuva 66. Taso 1250, kontaktikohta perässä 9. Siniset viivat tunnelin alkuperäiset, mitatut kainalolinjat. Surpac:n mittaustyökalun avulla mitattuna vajoaman suuruus 1,7-2 metriä.



Kuva 67. Taso 1275, perä 4. Sijainti merkitty oikealla alhaalla olevaan tasokarttaan punaisella ympyrällä. Siirtymäpinnasta on tehty tasoja, vasemmalla oleva kuva ylhäältä päin nähtynä, oikealla oleva kuva viistosti sivusta. Siirtymäpinnat eivät ole täysin saman suuntaisia.



Kuva 68. Sama paikka kuin edellisessä kuvassa, yksityiskohta siirtymäpinnasta perän katosta. Mittaukset suoritettu Surpac:n mittaustyökalulla, mittauspaikka näkyvissä valkoisella katkoviivalla. Siirtymäpinnan leveys eri päivinä otetuissa kuvissa on noin 75,5 cm.

6. TULOSTEN TARKASTELU

Suurin osa kuvista on malmion keski- ja eteläosista. Etenkin tasoilta 1275 ja 1250 on paljon kuvia. Malmion pohjoisosista kuvia on vähemmän. Kuvien määrä on vähäinen myös malmion pohja- ja yläosista. Tämä on huomioitava tuloksia tarkasteltaessa. Kuvien epätasaisesta määrästä johtuen rakoilun tarkastelu eri malmityyppien suhteen on haastavaa. Muutamissa katkoissa rakoja ei ollut lainkaan havaittavissa, tällaisten havaintojen huomioiminen Surpac:ssa Structural Suite:n avulla osoittautui haasteelliseksi.

6.1. Rakohavainnot

Poikkeavat raot vaikuttavat paikoitellen hyvin pitkiltä, ja rakopintojen hapettuminen, 'ruostuminen', viittaisi siihen, että vesi on päässyt virtaamaan raoissa, mikä myös tukisi olettamusta, että rakoiluvyöhykkeet ovat luultavasti pituudeltaan useita kymmeniä metrejä. Rakoiluvyöhykkeiden paksuus on kuitenkin enimmäkseen oletettavasti kapeampi, paikoitellen poikkeavaa rakoilua on havaittavissa vain muutaman katkon alueella louhosperissä. Osaltaan tämä on vaikeuttanut rakoiluvyöhykkeiden havaitsemista, koska yhdestäkään louhosperästä ei löydy kuvia jokaisesta katkosta.

Malmiossa havaittavien etelään viettävien loiva-asteisten rakoiluvyöhykkeiden kaateen suunta on sama kuin sivukiven pääarakosuunnan kaateen suunta (Kuva 6). Sivukiven puolella pegmatiittijuonista ja muutamasta siirrospinnasta tehdyt havainnot viittaisivat siihen, että kyseinen, pohjois—etelä -suuntainen rakenne saattaa olla vanhempaa alkuperää. Toisaalta on myös havaintoja pohjoiseen viettävistä rakoiluvyöhykkeistä ja samansuuntaisesta pegmatiittijuonesta malmion etelä- ja pohjoispuolelta. Oletettavasti nämä rakenteet liittyvät toisiinsa.

Pegmatiiteista tehdyt loivasti pohjoiseen, etelään ja lounaaseen viettävät suuntamittaukset sopivat jossain määrin oletukseen, jonka mukaan pegmatiitit tunkeutuivat paikalleen D₄-vaiheen loppupuolella. Juonten suuntia havainnoitiin vain muutamassa paikassa, joten otanta on hyvin suppea. Kuitenkin on selvästi havaittavissa juonten samansuuntaisuus verrattuna malmiossa havaittuihin rakoiluvyöhykkeisiin.

Tasolla 1150 apuperässä 4 havaittu avoin rako, sekä muut samassa perässä havaitut saman suuntaiset rakohavainnot ovat mitä ilmeisimmin vetorakoja, ja liittyvät malmion vajoamiseen. Toisaalta 1175-tasolla on sijainnut laaja, sortumien aikaansaama tyhjä tila, joka myös saattaa selittää 1150-tason rakenteen (Katja Sahala, henkilökohtainen tiedonanto 12.8.2015).

6.2. Malmion lävistävä rakoiluvyöhyke

Bergström (2011) oli tehnyt mahdollisesti samasta, malmiota lävistävästä rakoiluvyöhykkeestä havaintoja jo vuonna 2011. Alue oli tuolloin seismisesti aktiivinen, eli joko kyseinen rakenne oli jo aiemmin olemassa ja se vain uudelleenaktivoitui louhinnan seurauksena tai rakenne syntyi vasta tuossa vaiheessa. Bergström on mallintanut seismisesti aktiiviset rakenteet melko suoraviivaisiksi ja kapeiksi, mutta ilmeisesti ne ovat paljon monimutkaisempia. On kuitenkin otettava huomioon, että malmio ei ole enää yhtenäistä kalliomassaa, vaan välistä on louhittu suuria palasia pois. Tämä vaikeuttaa tulkintojen tekemistä.

Malmion lävistävä rakoiluvyöhyke on suurin piirtein samansuuntainen Oulunjärven hirtovyöhykkeen kanssa, mutta ei ole tietoa rajoittuuko rakenne vain malmion alueelle, vai ulottuuko se sivukiven puolelle. Rakenne voi olla puhtaasti myös malmion vajoamisen seurauksena syntynyt. Malmiossa havaittava sulkeumista koostuva rakenne osuu suurin piirtein samalle alueelle rakoiluvyöhykkeen kanssa, mikä myös saattaa selittää rakenteen syntyä.

6.3. Muut rakennegeologiset havainnot

Rakennegeologisia havaintoja tehtiin kuvista lähinnä esimerkin vuoksi, koska tutkielman aiheena ei ollut malmion rakennegeologinen mallintaminen tai analysointi. Rakenteita on mahdollista mallintaa kuvista kolmiulotteisesti, vaikkakin pegmatiittijuonten suuntien mallinnukset ovat tulkinnanvaraisia. Kuvissa on havaittavissa muun muassa

poimurakenteita, joita ei käsitelty tässä tutkielmassa tarkemmin. Myöskin sulkeumat jätettiin kokonaan huomioimatta, lukuunottamatta malmion keskellä olevaa sulkeumavyöhykettä. Etenkin malmion eteläpuolella vaikuttaa olevan suuria, vaihtelevan koostumuksen omaavia sulkeumia. Sulkeumissa on myös havaittavissa esimerkiksi poimurakenteita liuskerakenteisissa kivissä.

Malmiossa havaitut kerrokselliset/raitaiset rakenteet voivat olla malmion kerrostumisen aikaisia. Kyse voi myös olla myöhemmissä deformaatiovaiheissa muodostuneista rakenteista. Malmion keskellä menevä sulkeumavyöhyke vaikuttaa ulottuvan lähes malmion päästä päähän, rakenne vaatisi kuitenkin tarkempaa tutkimusta, että sen muodostumisvaiheesta saisi varmuuden. Tehdyissä ja tekemättömissä 3D-kuvissa on runsaasti geologisia rakenteita näkyvissä, joita ei tässä tutkielmassa huomioitu lainkaan.

6.4. Siirtymien vertailu

Siirtymäkohdista otettujen 3D-kuvien vertaaminen päällekkäin osoittautui yllättävän haastavaksi. Tiedostot ovat hyvin suuria, ja yleensä kaikkia samasta siirtymäkohdasta otettuja kuvia ei pysty avaamaan Surpac:ssa samanaikaisesti. On kuitenkin ilmeistä, että mitä kauemmas kuvassa siirrytään mittapisteistä, sitä epätarkempia 3D-mallit ovat. Eri päivinä otetut kuvat eivät osu Surpac:ssa kaikista kohdista ns. päällekkäin, vaan heittoa on pahimmillaan kymmeniä senttejä. Virhelähteiden tarkastelu on haastavaa. Mittapisteiden merkitseminen ja sijoittelu voivat olla yksi syy miksi kuvat eivät osu päällekkäin, mutta ongelma saattaa johtua myös kuvienottotavasta. Oletuksena oli, että mittapisteet sijaitsevat liikkumattomalla alueella, mutta on myös mahdollista, että kallio on liikkunut alueella missä mittapisteet sijaitsivat. Mittapisteet oli piirretty suoraan ruiskubetoniin, joka on varsin epätasainen alusta, mikä myös vaikutti pisteiden mittaustarkkuuteen.

Valmiit 3D-mallit ovat kuitenkin ilmeisesti suurin piirtein oikean muotoisia, vaikka kuvat eivät täysin osukkaan Surpac:ssa oikealle paikalle. Kuvissa on myös havaittavissa, jos kuvattavalla alueella tapahtuu muutoksia, esimerkiksi uusien rakojen muodostumista ruiskubetoniin. Lisäksi on ilmeistä, että merkittävää ja selvästi näkyvää liikettä ei ole tapahtunut kontaktikohtien alueella verrattuna aikaisempina vuosina tapahtuneeseen liikkeeseen. Toisaalta malmion ylemmillä tasoilla aiempina vuosina tapahtunut liike ei ole

ollut yhtä selvää, eikä siellä ole havaittavissa samankaltaisia porrasmaisia siirtymäkohtia kuin esimerkiksi tasolla 1250 tai 1200. Tämä voi selittyä osin malmion muodolla ja sillä, että monet ylempien tasojen malmiperät ovat hyvin uusia. On kuitenkin varsin ilmeistä ja jo aiemmin tiedostettua, ettei jäljellä oleva malmio ole vajonnut yhtenäisenä massana alaspäin. Koska vajouman suuruus kuitenkin ilmeisesti on pahimmillaan useita metrejä, jäljellä olevasta malmiosta saattaa löytyä lisää laajoja ja hyvin avonaisia rakoja, kuten tasolla 1150.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

3D-kuvien avulla on mahdollista saada hyvin tarkkaa tietoa kallion rakoilusta. Structural Suite:n avulla rakenteiden suuntien mittaaminen on nopeaa ja helppoa sekä tarkempaa kuin tavallisilla menetelmillä. Joissakin tapauksissa rakenteiden hahmottaminen 3D-kuvista on jopa helpompaa kuin perinteisin peräkartoitusmenetelmin. Kartoitettu tieto on myös heti kolmiulotteisessa muodossa, ja rakenteiden jatkuvuuksia on helppo vertailla eri tasojen välillä. Kuvia ja tulosten paikkansapitävyyttä on myös mahdollista tarkastella myöhemmin uudestaan.

Malmion rakoilu on joiltakin osin paljon monimutkaisempaa kuin aiemmin on oletettu. Mallia malmion rakoilusta olisi mahdollista päivittää sitä mukaa, kun peränaajo etenee. Nyt tehtyjä rakokartoitustuloksia voisi myös vertailla tarkemmin aiemmin tehtyihin rakokartoituksiin. Structural Suite:n avulla on mahdollista tarkastella havaittujen rakoiluvyöhykkeiden mahdollisia ulottuvuuksia ja esiintymistä, sekä mahdollisesti arvioida ennalta louhinnassa vastaan tulevien rakovyöhykkeiden suuntia.

Seismiikan avulla on ilmeisesti mahdollista havaita seismisesti aktiivisia rikkonaisia rakenteita. Tätä olettamusta tukevat Bergströmin (2011) tekemät havainnot, kuin myös Mattilan (2015) väitöskirja. Mallia malmion rakoilusta voisi mahdollisesti yrittää tarkentaa vertailemalla nyt tehtyjä havaintoja rikkonaisista vyöhykkeistä vanhoihin havaintoihin seismisistä tapahtumista.

Kaikista Pyhäsalmen kaivoksella otetuista peräkuvista ei tehty tätä tutkielmaa varten 3D-kuvia, nämä jäivät tekemättä noin kahdesta sadasta katkosta. Muiden geologisten rakenteiden kuin rakojen tulkinta ei ollut gradun tarkoituksena, joten niitä on käsitelty hyvin pintapuolisesti. 3D-kuvat tarjoavat kuitenkin täysin uudentyyppisen tavan geologisten rakenteiden kartoittamiseen. Kuvat tarvitsevat kuitenkin tuekseen aiemmin tehtyjä geologisia havaintoja, esimerkiksi kairasydännäytteistä tehtyjä tutkimuksia niin, että niitä voisi hyödyntää tarkempaan rakennegeologiseen analyysiin.

Kallion liikkeen voi ehkä havaita 3D-valokuvaustekniikan avulla, mikäli liike on riittävän suurta, tai mittauskausi tarpeeksi pitkä. Hyvin pienen mittakaavan liikkeen havaitsemiseen menetelmän tarkkuus ei luultavastikkaan vielä riitä. Kuvat kuitenkin antavat

siirtymäkohdista hyvin havainnollista tietoa. Menetelmän tarkkuutta voisi yrittää parantaa monellakin eri tavalla. Mittapisteiden sijoittelua ja merkitsemistä voisi miettiä uusiksi, samoin kuvienottotapaa. Mittapisteiden määrää voisi kokeilla kasvattaa, ja muutaman pisteen voisi merkitä esimerkiksi tunnelin kattoon. Mittapisteen olisi oltava mahdollisimman pieni, mutta kuitenkin selvästi erottuva. Mittapisteen pinnan tulisi ilmeisesti olla myös mahdollisimman tasainen. Myös 2D-kuvien tarkkuudella on ilmeisesti vaikutusta valmiin 3D-mallin tarkkuuteen, 2D-kuvien tarkkuutta voisi parantaa käyttämällä lankalaukaisinta ja lisäämällä kuvien syväterävyyttä. Kuvien ottamiseen on olemassa useita eri tapoja, ja voisi kokeilla, millä menetelmällä saavutetaan kaikkein suurin tarkkuus.

3D-aineiston esittäminen on hyvin haastavaa 2D:nä. Aineistoa olisi aina järkevintä tarkastella alkuperäisessä muodossa. Rakenteiden ja niiden suuntien esittäminen on vaikeaa 2D-kuvina, varsinkin jos rakenne ulottuu useammalle tasovälille. Toisaalta rakenteista on paljon helpompi tehdä havaintoja 3D-kuvista, kuin perinteisillä kartoitusmenetelmillä.

3D-valokuvaustekniikan tarkkuutta kallion liikkeen seurannassa voisi vielä parantaa. Perinteinen peränkartoitusmenetelmä on nopea, helppo ja useimmissa tapauksissa riittävän tarkka, mutta rakojen ja geologisten rakenteiden mittaaminen ja tulkitseminen on kuitenkin helpompaa, tarkempaa ja turvallisempaa 3D-kuvien avulla. 3D-kuvia voisi käyttää apuna malmion tarkemman rakennegeologisen mallin luomiseen, ja mallia malmion rakoilusta voisi edelleen päivittää ja kehittää.

8. KIITOKSET

Tahtoisin esittää erittäin suuret kiitokset Pyhäsalmi Mine Oy:lle, joka mahdollisti tämän gradun teon. Erityisesti tahdon kiittää graduohjaajaani Mikko Nummista, suuresta ajallisesta panostuksesta sekä tuesta. Kiitän Katja Sahalaa, Pekka Bergströmiä sekä Pekka Tölliä, kuin myös kaikkia muita Pyhäsalmissa gradunteossani avustaneita henkilöitä.

Suuret kiitokset kuuluvat myös WSP Finland Oy:lle, gradun teko ei olisi ollut mahdollista ilman heidän tietoteknistä osaamistaan ja tukeaan. Kiitän Petteri Somervuorta, sekä Tuomas Rantasta ja Jaakko Ingerttilää, saamistani neuvoista.

Lopuksi vielä kiitokset kaikille niille henkilöille, jotka tavalla tai toisella ovat avustaneet graduntekoani. Kiitokset tietenkin myös Pyhäsalmen näyttötekniikan kehittäjille, Jannelle ja Tonille.

9. LÄHTEET

- ADAM Tecnology 2010. 3DM Analyst Mine Mapping Suite 2.3.4 User's Manual. Belmont, Australia.
- Barrie, C., ja Hannington, M. 1999. Introduction: Classification of VMS deposits based on host rock composition. In: Barrie, C., ja Hannington, M., (toim.) 1999. Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings. Reviews in Economic Geology, 8. 2-10.
- Bergström, P., Sahala, K. ja Hakala, M. 2014. From high stress to de-stressed – mining in changing conditions. Deep Mining 2014, Australian Centre for Geomechanics, Perth. 209-224.
- Ekdahl, E. 1993. Early Proterozoic Karelian and Svecofennian formations and the evolution of the Raahe-Ladoga Ore Zone, based on the Pielavesi area, central Finland. Geological Survey of Finland, Bulletin 373.
- First Quantum Minerals 2014. Pyhäsalmi statement report. Report on estimated mineral reserves and resources, Pyhäsalmi mine, Finland.
- Franklin, J., Lydon, J., and Sangster, D. 1981. Volcanic-associated massive sulfide deposits. Teoksessa: Skinner, B., (ed) Economic Geology 75th Anniversary Volume: Society of Economic Geologists, 485-627.
- Franklin, J., Gibson, H., Jonasson, I., ja Galley, A. 2005. Volcanogenic Massive Sulfide Deposits. Teoksessa: Hedenquist, J., Thompson, J., Goldfarb, R., ja Richards, J. (toim.) 2005. Economic Geology 100th Anniversary Volume, The Economic Geology Publishing Company. 523-560.
- Galley, A., Hannington, M., ja Jonasson, I. 2007. Volcanogenic massive sulphide deposits. Mineral Deposits of Canada: A Synthesis of Major Deposit-Types, District Metallogeny, the Evolution of Geological Provinces, and Exploration Methods. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, Special Publication 5, 141-161.
- Hakala, M., ja Heine, J. 2014. In Situ Stress Measurement with LVDT-cell in Pyhäsalmi Mine at 1430 level. Stress Measurement Company Oy, Nokia. 62s.
- Hakala, M., Somervuori, P. ja Syrjänen, P. 1998. Rock mechanical study of the new mine area at depth levels 1050...1400. Report n:o GEO-15-001. Outokumpu Mining Oy Pyhäsalmi mine.
- Hakala, M., Somervuori, P. ja Syrjänen, P. 1999. Rock mechanical study of the new mine area at depth levels 1050...1400 – Part II. Outokumpu Mining Oy Pyhäsalmi mine.
- Hakala, M., Kuula, H., Matinlassi, M., Somervuori, P., Syrjänen, P. ja Tolppanen, P. 2002. Analyses of tunnel stress failures at Pyhäsalmi mine, Working Report 2002-28. Posiva Oy.
- Imaña, M. 2003. Petrography, Mineralogy, Geochemistry and 3D Modelling of the A Zinc ore in The Pyhäsalmi Zn-Cu VMS deposit, central Finland. Pro Gradu –tutkielma, Turun yliopisto, Geologian ja minerologian laitos, 72s.
- Kousa, J., Marttila, E. ja Vaasjoki, M. 1994. Petrology, geochemistry and dating of Paleoproterozoic metavolcanic rocks in the Pyhäjärvi area, central Finland. Geological Survey of Finland, Special Paper 19, 7-27.
- Kähkönen, Y. 1998. Svekofenniset liuskealueet - merestä peruskallioksi. Teoksessa: Lehtinen, M., Nurmi, P. ja Rämö, T. (toim.) 1998. Suomen Kallioperä 3000 vuosimiljoonaa. Suomen Geologinen Seura r.y., Helsinki. 199-288.
- Kähkönen, Y. ja Lehtinen, M. 1998. Geologian peruskäsitteitä. Teoksessa: : Lehtinen, M., Nurmi, P. ja Rämö, T. (toim.) 1998. Suomen Kallioperä 3000 vuosimiljoonaa. Suomen Geologinen Seura r.y., Helsinki. 24-91.
- Kärki, A., Laajoki, K. ja Luukas, J. 1993. Major Paleoproterozoic shear zones of the central Fennoscandian shield. Teoksessa: Gorbatshev, R. (toim.) The Baltic Shield. Special Volume. Precambrian Res. 64, 207-223.
- Lamberg, M., Kuula, H., ja Hakala, M. 2013. Life of Mine Rock Mechanical Simulation for Pyhäsalmi Mine Oy, Research report. Pöyry Finland Oy, Helsinki.
- Ledger, L. 1999. Stress measurement in the 1125m level. Internal report, Outokumpu Mining Oy, Pyhäsalmi Mine. Rock Mechanics Technology Ltd., UK. 7 pp
- Lundqvist, T., Bøe, R., Kousa, J., Lukkarinen, H., Lutro, O., Roberts, D., Solli, A., Stephens, M., ja Weihed, P. 1996. Bedrock map of Central Fennoscandia. Scale 1:1 000 000. Geological Surveys of Finland (Espoo), Norway (Trondheim) and Sweden (Uppsala).

- Luukas, J., Kilpeläinen, T. ja Tapio, A-P. 1999. Structural and deformation modeling and metamorphism. Teoksessa: Puustjärvi, H. (toim). Pyhäsalmi Modeling Project. Technical report, Outokumpu Mining Oy ja Geological Survey of Finland. 251s.
- Luukkonen, K., Lähtenmäki, S. ja Mäki, T. Pyhäsalmen kaivos 1962 – 2012, Saarijärven Offset Oy.
- Mattila, J. 2015. Genesis and evolution of brittle structures in Southwestern Finland and Western South Africa. Turun yliopisto, Maantieteen ja geologian osasto, Turku. 110s.
- Miettinen, E. 2011. Detailed geology of the level -1275, Pyhäsalmi mine, central Finland and genetic implications of rock inclusions within the ore body. Pro Gradu –tutkielma, Helsingin yliopisto, Geotieteiden ja maantieteen laitos, 67s.
- Mikhail, E. M. ja Bethel, J.S. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons, USA. 496 s.
- Mononen, S. 2000. Stress measurement with CSIRO-HI cell on levels 1325, 1350, 1375 at Pyhäsalmi, Helsinki University of Technology, Espoo.
- Mäki, T. ja Puustjärvi, H. 2003. The Pyhäsalmi massive Zn-Cu-pyrite deposit, middle Finland – a Palaeoproterozoic VMS-class “giant”. Teoksessa: Kelly, J., Andrew, C., Ashton, J., et al. (Eds.). Europe’s Major Base Metal Deposits. The Irish Association for Economic Geology, Dublin. 87-100.
- Puustjärvi, H. (toim.) 1999. Pyhäsalmi Modelling Project. Technical Report 13.5.1997 – 12.5.1999. Outokumpu Mining Oy, Geological Survey of Finland.
- Pyhäsalmi Mine Oy. 2014. Rockmechanics –esitelmä, Vuorimieskilta 10.2.2014.
- Shanks III, W.C. Pat. 2012. Hydrothermal alteration in volcanogenic massive sulfide occurrence model: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5070 –C, chap. 11. 12 s.
- Struthers, M., A. 2005. Pyhäsalmi Mine Oy, Rock Mechanics Review. AMC Consultants (UK) Limited.
- Syrjänen, P., Antikainen, J., Hakala, M., Mikkola, J., Mononen, S. ja Sahalahti, K. 2008. Kalliomekaaninen suunnittelu. Teoksessa: Hakapää, A. ja Lappalainen, P. 2008. Kaivos- ja louhintatekniikka. Kaivannaisteollisuus ry ja Opetushallitus, Helsinki. Liite-dvd, luku 4.
- Weihed, P. ja Mäki, T. 1997. Volcanic hosted massive sulphide and gold deposits in the Skellefte District, Sweden and Western Finland. Excursion guidebook A2. In 4th Biennial SGA Meeting, August 11-13, 1997, Turku, Finland, 81s.